

М. С.
ГОМЕЛЬСКИЙ

**ТОНКИЙ
ОТЖИГ**
**ОПТИЧЕСКОГО
СТЕКЛА**



М. С. ГОМЕЛЬСКИЙ

ТОНКИЙ ОТЖИГ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА



ИЗДАТЕЛЬСТВО „МАШИНОСТРОЕНИЕ“
ЛЕНИНГРАД 1969

Тонкий отжиг оптического стекла. Гомельский М. С. Изд-во «Машиностроение», 1969 г. 152 стр. Табл. 24. Илл. 48. Библ. 36 назв.

В книге рассказано о процессах, происходящих в стекле при его охлаждении и переходе из вязкого состояния в хрупкое, о причинах возникновения в нем физических неоднородностей и двойного лучепреломления; показано влияние характера размещения заготовок в печи на качество отжига и на выбор его режима; описываются способы и приемы укладки, способствующие повышению качества отжига.

Подробно даны типы отжига и основные этапы этого процесса. Приведены методы, формулы и таблицы для расчета режима отжига по этапам в зависимости от размера, технических условий и характера укладки заготовок, классификация печей по типам, размерам и классам точности выполнения режима. Рассмотрены преимущества и недостатки отдельных моделей печей, укладочные приспособления, вспомогательное оборудование и аппаратура для программного регулирования регистрации исполнительного режима.

Книга рассчитана на инженерно-технических и научных работников, занятых в области производства оптического стекла и в смежных с ним отраслях; она также может быть полезна студентам вузов в соответствующей специализации.

Рецензенты д-р хим. наук проф. *К. С. Евстропьев*
и канд. техн. наук *В. А. Кузяк*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основным качеством оптического стекла, отличающим его от стекла технического, является его высокая оптическая однородность. Из оптического стекла изготавливаются оптические детали различных приборов научного, технического, военного и гражданского назначения. Чем точнее, чувствительнее и ответственнее прибор, тем более высокой должна быть однородность стекла его оптических деталей.

Заготовки для оптических деталей выпускаются заводами оптического стекла. Прежде чем принять окончательную форму заготовки, оптическое стекло проходит горячую обработку, например разделку отливкой в плиты и листы, формование путем моллирования или прессования. После каждого из этих процессов стекло подвергается грубому отжигу, целью которого является предотвращение образования трещин в процессе охлаждения и во время последующей механической обработки. Стекло, прошедшее грубый отжиг, обычно обладает большими напряжениями и настолько неоднородно, что не может быть непосредственно использовано для изготовления оптических деталей.

Для того чтобы заготовкам оптического стекла придать требуемую степень однородности, их необходимо подвергнуть особо тщательному и осторожному отжигу, который называют «тонким». Тонкий отжиг имеет и другие задачи. В процессе тонкого отжига оптические постоянные стекла изменяются и принимают те окончательные значения, которыми должны обладать оптические детали. Тонкий отжиг ослабляет напряжения в заготовках до такого минимально необходимого значения, которое не будет создавать затруднений при точной обработке поверхностей заготовок.

Тонкий отжиг, отличающийся от грубого очень медленным охлаждением, проводится строго по заданному, точно рассчитанному режиму. Это длительный процесс, продолжающийся несколько суток, а в особых случаях

и несколько десятков суток. Поэтому его не целесообразно применять на ранних стадиях технологического процесса производства, когда наряду с годным имеется также значительное количество «лишнего» стекла. Под лишним стеклом мы подразумеваем технологические отходы: участки, содержащие внутренние пороки, внешние дефекты и технологические припуски. В тонкий отжиг, как правило, направляется стекло, подогнанное под заданный размер и отвечающее техническим условиям по всем показателям качества, не зависящим от отжига. Тонкий отжиг является завершающим этапом в технологическом процессе производства оптического стекла.

Технология тонкого отжига в современном ее виде возникла не сразу — она развивалась по мере повышения требований к качеству заготовок оптического стекла, увеличению разнообразия их форм и размеров, росту массовости, многосерийности их выпуска. Совершенствование технологии тонкого отжига стекла происходило на основе изучения его поведения и изменения его свойств при нагревании и охлаждении в интервале температур от комнатной до температуры размягчения.

Развитие и совершенствование технологии тонкого отжига влекло за собой совершенствование средств его осуществления — печей отжига и вспомогательного оборудования.

В выпущенной до настоящего времени литературе освещались частные вопросы теории и практики тонкого отжига, однако ни в одном издании технология тонкого отжига не была рассмотрена во всем своем объеме. Поэтому работники промышленности до сих пор не имеют книги, которая помогла бы им в трудных случаях.

В настоящей книге автором сделана попытка восполнить этот пробел.

В книге обобщен опыт, накопленный в промышленности, результаты наиболее интересных работ научного и технологического характера, в том числе и личный практический опыт автора. Пп. 18—20 написаны на основе работ доц. В. Н. Зимина, не опубликованных в широкой технической литературе, и помещены с его согласия.

Автор выражает искреннюю признательность д-ру физ.-матем. наук А. И. Стожарову за поданную им мысль написать эту книгу, д-ру техн. наук Л. И. Демкиной и доц. В. Н. Зимину за их ценные советы и замечания, сделанные во время работы автора над книгой.

ГЛАВА I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОТЖИГА

1. Представление о строении стекла

Прежде чем приступить к ознакомлению с явлениями, происходящими в стекле в процессе его отжига, следует хотя бы очень кратко упомянуть о строении стекла и об изменении его свойств в процессе отвердевания и охлаждения до комнатной температуры или при обратном ходе процесса.

По многим свойствам стекло при комнатной температуре весьма близко к твердому телу, под которым обычно понимают вещество в кристаллическом состоянии. Например, при комнатной температуре стекло является твердым и в известной мере упругим, обладает достаточно высоким сопротивлением к механическим воздействиям различных видов; в то же время у него отсутствует или почти отсутствует способность пластически деформироваться под нагрузкой, оно отличается высокой хрупкостью.

Основное различие между стеклом и кристаллом заключается в том, что стекло (отожженное) по всем свойствам изотропно, кристаллические же вещества анизотропны по всем или по ряду свойств.

Переход кристаллических веществ (определенных соединений и эвтектических сплавов) из твердого состояния в жидкое, как и обратный переход, происходит резко, скачкообразно и (при постоянстве внешнего давления) всегда при одной определенной температуре, называемой температурой плавления. Стекло переходит из механически твердого в капельно-жидкое состояние в более или менее широком интервале температур, путем постепенного размягчения или отвердевания с непрерывным и обратимым изменением вязкости.

Далеко не все вещества могут переходить в стеклообразное состояние. Легко образуют стекла окислы

некоторых элементов, например кремния, бора, фосфора, а также их соединения с окислами щелочно-земельных металлов и элементов других групп.

В энергетическом отношении кристаллическое состояние является более устойчивым: при кристаллизации происходит выделение всей энергии плавления. При стеклообразном отвердевании эта энергия выделяется не полностью. В стеклообразном состоянии вещество всегда обладает повышенным хотя и небольшим по величине запасом внутренней энергии по сравнению с кристаллическим его состоянием.

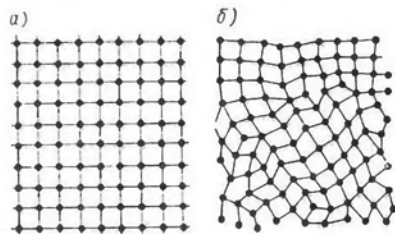


Рис. 1. Схема структуры кристалла (а) и стекла (б)

В благоприятных температурных условиях, если они поддерживаются необходимое для этого время, совершается самопроизвольный переход вещества из стеклообразного в кристаллическое состояние с выделением при этом энергии.

Соответственно характеру перехода вещества из жидкого состояния в твердое и из твердого в жидкое происходит и изменение всех его свойств: в кристаллах оно происходит скачкообразно в момент плавления, а в стекле — постепенно и непрерывно по мере его отвердевания или размягчения.

Различие в свойствах веществ в кристаллическом и стеклообразном состояниях определяется разной их структурой. Вещество в кристаллическом состоянии имеет упорядоченное строение: в идеальном случае все структурные ячейки его расположены в строгом порядке (рис. 1, а), одинаковом в любой его части независимо от размера. Поэтому и силы связи между ними одинаковы. В стеклообразном же состоянии вещество не обладает упорядоченностью — оно является аморфным (рис. 1, б). Имеется несколько различных представлений о характере этой неупорядоченности, т. е. о природе стеклообразного состояния.

Однако в последнее время все большее экспериментальное подтверждение и большее признание находит

гипотеза о кристаллитном строении стекла, развиваемая советской школой ученых.

Под кристаллитами в настоящее время подразумевают участки стеклообразного вещества, обладающие значительной степенью упорядоченности частиц, соответствующей расположению их в кристалле того же химического состава. Размеры кристаллитов составляют от нескольких десятков до нескольких сотен ангстремов. Промежутки между кристаллитами имеют неупорядоченное или мало упорядоченное расположение частиц и представляют собой аморфную прослойку. Кристаллиты, располагаясь в определенном порядке, образуют упорядоченные агрегаты.

Связи частиц внутри кристаллитов сильнее, нежели в аморфной прослойке. Сила связей между кристаллитами в агрегате также различна. Таким образом, в стеклообразном веществе наблюдается большое разнообразие в характере и силе связей между частицами и их группами, в подвижности частиц и их агрегатов в структурных ячейках разного масштаба. Этим и объясняется отсутствие в стеклообразных веществах определенной «температуры плавления», свойственной кристаллам. Вместо нее имеется температурная область, в которой происходит постепенное размягчение вещества. Можно сказать, что в этой области происходит последовательное плавление различных структурных элементов вещества.

Размеры кристаллитов и размеры их агрегатов или других упорядоченных структурных участков растут с понижением температуры стекла. При этом увеличивается внутреннее трение в стекле и возрастает его вязкость. Возрастание вязкости и приводит к переходу стекла из расплавленного состояния в размягченное, затем в упруго-вязкое и, наконец, в упругое.

Границы между этими стадиями состояния стекла можно приблизительно обозначить значениями вязкости. Так, при вязкостях менее 10^9 лз стекло находится в размягченном состоянии: оно легко деформируется под действием небольших усилий. В области вязкостей 10^9 — 10^{13} лз стекло хорошо сохраняет свою форму, но все же в нем могут возникать небольшие пластические деформации под действием внешних или внутренних напряжений. Поэтому в этом интервале вязкостей не могут даже временно сохраняться внутренние напряжения: они

сразу же релаксируют вследствие перераспределения частиц.

При вязкостях от 10^{13} пз и выше в стекле начинают проявляться упругие свойства. При таких вязкостях оно ведет себя как упруго-вязкое тело. Чем ниже становится температура и чем больше вязкость, тем в большей степени стекло ведет себя как упругое тело и в меньшей — как вязкое. Это значит, что при кратковременном действии силы в стекле не успевает возникнуть пластическая деформация, или если она и возникает, то является незначительной; тело испытывает упругую деформацию, т. е. ведет себя как упругое. Если сила действует длительное время, то упругая деформация переходит в пластическую и тело ведет себя как вязкое.

Когда вязкость достигает приблизительно 10^{18} — 10^{19} пз, стекло становится упругим телом, в нем практически полностью прекращаются релаксационные процессы (если в какой-то мере они остаются, то протекают весьма медленно — веками, а вызываемые ими деформации являются ничтожно малыми).

При комнатных температурах практически всякое стекло ведет себя как твердое тело. Температуру, отвечающую вязкости 10^{13} пз, принято обозначать t_g , а вязкости 10^9 пз — t_f .

С изменением температуры стекла изменяются все другие свойства, в том числе механические, термические, оптические. Наиболее значительное их изменение происходит в области температур, в которой стекло переходит из вязкого в твердое, упруго-хрупкое состояние. Выше и ниже этой области изменение числовых значений свойств стекла менее значительно. Характер изменения некоторых свойств при переходе из одного состояния в другое различен. Например, показатель преломления стекла в его вязком и упруго-хрупком состоянии уменьшается с понижением температуры, а в области перехода из одного состояния в другое — растет.

2. Разность температур в стекле при его нагревании или охлаждении

Теплопередача в твердых телах происходит благодаря теплопроводности. В телах, прозрачных для лучистой энергии, к которым относится и оптическое стекло, начи-

ная с 400°C заметное участие в теплопередаче начинает принимать теплоизлучение. Роль излучения в переносе тепла значительно растет с повышением температуры.

Каким бы путем ни происходило распространение тепла в теле, скорость этого процесса при каждой температуре конечна. Она зависит от теплопроводности и теплопрозрачности тела. Поэтому при нагревании или охлаждении тела в нем неизбежно возникает разность температур между поверхностью тела, непосредственно участвующей в теплообмене с внешней средой, и его внутренними слоями. Эта разность температур, называемая также температурным перепадом, зависит не только от скорости распространения тепла в теле, но и от его размеров и скорости изменения температуры его поверхности, т. е. от скорости нагревания или охлаждения.

При нагревании или охлаждении поверхности тела с постоянной скоростью в начальный период скорость изменения температуры внутренних точек тела отстает от скорости изменения ее на поверхности. По истечении некоторого промежутка времени во всех точках тела устанавливается такая же скорость нагревания или охлаждения, какую имеет его поверхность. Такой случай нагревания (охлаждения), когда изменение температуры всех точек тела происходит равномерно с одинаковой скоростью, называется регулярным режимом. Промежуток времени, в течение которого устанавливается регулярный режим, называется переходным периодом.

Расчет температурного перепада в телах простой геометрической формы при регулярном режиме производится по общеизвестным формулам, найденным Е. Вильямсоном и Л. Адамсом [34]. Дополнительным условием применимости формул является изотермичность всей поверхности тела в процессе нагревания или охлаждения.

В неограниченной пластине, в которой толщина во много раз меньше ее других размеров (такую пластину называют также тонкой), разность температур Δt_x поверхности и слоя, находящегося на расстоянии x от средней плоскости

$$\Delta t_x = \pm \frac{h}{2a} (b^2 - x^2). \quad (1)$$

Здесь b — полутолщина пластины;
 h — скорость ее нагревания или охлаждения;

α — коэффициент температуропроводности материала пластины.

Коэффициент температуропроводности

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\gamma},$$

где λ — коэффициент теплопроводности;

c — удельная теплоемкость;

γ — плотность.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость распространения температуры в материале.

Формула (1) является уравнением параболы. В этой формуле знак плюс соответствует нагреванию тела и означает, что температура поверхностей пластины выше температуры ее в точке x . Знак минус отвечает охлаждению и свидетельствует о том, что температура поверхностей ниже температуры в точке x .

С увеличением x значение Δt_x уменьшается. При $x = b$ (на самих поверхностях) $\Delta t = 0$, а при $x = 0$, т. е. в средней плоскости

$$\Delta t = \pm \frac{hb^2}{2a}. \quad (1a)$$

Формула (1a) выражает разность температур поверхности и середины пластины, представляющую собой наибольший перепад температуры в ней. На рис. 2 показано изменение разности температур точки с координатой x и поверхности в зависимости от x .

Для неограниченного цилиндра радиусом R (длина цилиндра во много раз больше его диаметра) зависимость разности температур его поверхности и точки с координатой r выражается формулой

$$\Delta t_r = \pm \frac{h}{4a} (R^2 - r^2), \quad (2)$$

а наибольшая разность температур (на поверхности и на оси) при $r = 0$

$$\Delta t = \pm \frac{h}{4a} R^2. \quad (2a)$$

Для шара радиусом R соответственно

$$\Delta t_r = \pm \frac{h}{6a} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

$$\Delta t = \pm \frac{h}{6a} R^2. \quad (3a)$$

Если принять $R = a$, то выявится характерная связь между числом направлений теплообмена тела и числовым коэффициентом в формулах (1), (2) и (3). Для пластины, нагреваемой или охлаждаемой с двух сторон (через большие поверхности), коэффициент равен 2; для цилиндра, нагреваемого (охлаждаемого) через всю боковую поверхность, т. е. с четырех сторон, — коэффициент 4, а для шара, охлаждаемого с шести сторон, — 6. При одинаковой скорости охлаждения h перепады температуры в пластине, цилиндре и шаре будут относиться

$$\Delta t_n : \Delta t_u : \Delta t_m = \frac{1}{2} : \frac{1}{4} : \frac{1}{6}.$$

3. Напряжения в стекле временные и остаточные

Быстрое изменение температуры всякого тела, в частности стекла, влечет за собой образование значительных внутренних напряжений.

Перепад температур, возникающий в стекле при его нагревании или охлаждении, вызывает неравномерность расширения или сокращения внешних и внутренних слоев стекла. Результатом неравномерного расширения или сокращения является образование упругих деформаций растяжения или сжатия. Указанные деформации приводят к появлению внутренних напряжений. При нагревании внешние слои приобретают деформации и напряжения сжатия, а внутренние — напряжения растяжения (рис. 2, а); (напряжения показаны стрелками); при охлаждении, наоборот, во внешних слоях возникают деформации и напряжения растяжения, а во внутренних — сжатия

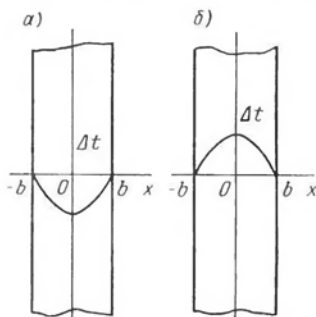


Рис. 2. Распределение перепада температуры в неограниченной пластине: а — при нагревании; б — при охлаждении

(рис. 2, б). Поскольку эти напряжения являются внутренними силами, то в любом случае сумма напряжений растяжения уравновешивается суммой напряжений сжатия. Между областью растяжения и областью сжатия всегда имеется переходная зона, где напряжения равны нулю (штриховая линия на рис. 3).

Если нагревание или охлаждение стекла происходит в области температур, при которых стекло находится в упруго-хрупком состоянии, т. е. ниже критической области, когда его вязкость чрезмерно велика, то возникшие при этом напряжения исчезают с устранением в нем перепадов температуры между внешними и внутренними слоями стекла. Иначе говоря, в упруго-хрупком состоянии стекла процесс образования напряжений обратим. Такие напряжения называются временными.

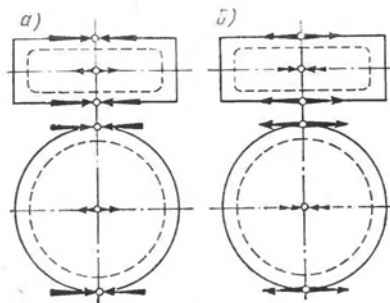


Рис. 3. Распределение напряжений в диске: а — при нагревании, б — при охлаждении

В том же случае, когда нагревание или охлаждение происходит в критической области или при более высоких температурах, когда стекло находится в упруго-вязком или пластичном состоянии, напряжения, возникающие вследствие перепадов температуры, частично или полностью релаксируют благодаря пластичным деформациям, т. е. перераспределению частиц, компенсирующему упругие деформации. Таким образом, в критической области при наличии перепада температуры в стекле напряжения могут либо быть весьма малыми, либо даже вовсе отсутствовать. С исчезновением же перепада снова возникают деформации, а с ними и напряжения, равные по величине и обратные по знаку тем (или той их части), которые ранее релаксировали. В тех случаях, когда исчезновение перепада температуры происходит в критической области, эти напряжения также постепенно релаксируют. Если же перепад температуры исчезает после того, как стекло охладилось ниже критической области и перешло в упруго-

хрупкое состояние, то напряжения в стекле, возникшие при этом, остаются. Релаксировать эти напряжения могут лишь при повторном нагревании стекла до критической области. Такие напряжения называются остаточными или постоянными.

Из изложенного следует, что стекло, охлаждаясь от критической области до нормальной температуры, приобретает остаточные напряжения, соответствующие по знаку напряжениям при нагревании. Процесс образования остаточных напряжений показан схематически на примере стеклянной пластинки на рис. 4. В начале охлаждения (рис. 4, а) между серединой и поверхностью пластинки имеется перепад температуры ($\Delta t \neq 0$), а напряжения отсутствуют ($P = 0$); после же полного остывания (рис. 4, б) перепад температуры отсутствует ($\Delta t = 0$), но зато имеются остаточные напряжения ($P \neq 0$).

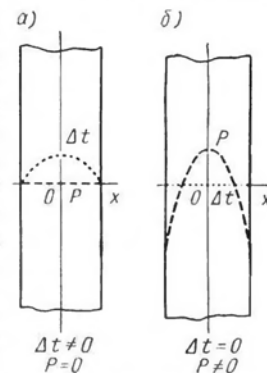


Рис. 4. Перепад температуры Δt и напряжение P в пластине в начале охлаждения (а) и после полного охлаждения (б)

Напряжения в стекле, связанные с температурными перепадами, зависят от размеров тела, свойств стекла и скорости изменения его температуры. Эти напряжения в некоторых телах простой геометрической формы, нагреваемых или охлаждаемых с постоянной скоростью, при изотермичности всех точек их поверхности могут быть вычислены с помощью несложных уравнений, найденных Адамсом и Вильямсоном [26]. Такими телами являются неограниченная пластина, массивный цилиндр неограниченной длины и массивный шар.

Неограниченная пластина. В неограниченной пластине имеются только напряжения, параллельные ее поверхностям. В направлении, перпендикулярном плоскостям, напряжения практически отсутствуют (рис. 4).

Напряжение P_x в точках пластины, удаленных на расстояние x в ту или другую сторону от средней плоскости пластины, выражается уравнением

$$P_x = \pm \frac{\alpha E h}{6\lambda(1-\mu)} (b^2 - 3x^2), \quad (4)$$

где b — полутолщина пластины в см;
 α — коэффициент термического линейного расширения стекла в $1/^\circ\text{C}$;
 a — коэффициент температуропроводности стекла в $\text{см}^2/\text{мин}$;
 E — модуль упругости (модуль Юнга) в $\text{кг}/\text{см}^2$;
 μ — коэффициент поперечного сжатия (коэффициент Пуассона);
 h — скорость нагревания или охлаждения в $^\circ\text{C}/\text{мин}$.
 Обозначим буквенный коэффициент при двучлене ($b^2 - 3x^2$) через θ

$$\theta = \frac{\alpha E}{a(1-\mu)} \frac{\text{кг} \cdot \text{мин}}{^\circ\text{C} \cdot \text{см}^4}. \quad (5)$$

Тогда

$$P_x = \pm \frac{\theta h}{6} (b^2 - 3x^2). \quad (4')$$

Свойства стекла разных марок различны. Поэтому для стекла каждой марки коэффициент θ имеет особое значение (табл. 1). Модуль Юнга и коэффициент Пуассона взяты по данным В. И. Кисина [14], коэффициент температуропроводности — по данным В. И. Вильнера и О. В. Ильиной [2], а коэффициент линейного расширения в интервале температур $20-120^\circ\text{C}$ — по ГОСТу 3514-67.

Для «среднего» стекла (подразумевается стекло, свойства которого соответствуют их средним для оптических стекол значениям) $\alpha = 80 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$, $a = 0,24 \text{ см}^2/\text{мин}$, $\frac{E}{1-\mu} = 0,83 \cdot 10^6 \text{ кг}/\text{см}^2$, $\theta = 27,5$, а $\theta/6 = 4,6$.

Подставляя это значение в уравнение (4'), получим

$$P_x = \pm 4,6h(b^2 - 3x^2). \quad (4'')$$

В табл. 2 дан примерный химический состав типовых стекол [15], близких к тем, которые приведены в табл. 1.

Свойства стекол изменяются в зависимости от температуры. В области относительно невысоких температур (ниже критической области) эти изменения невелики и ими можно пренебречь, принимая для расчетов значения свойств при температурах, близких к комнатным, подобные указанным в табл. 1.

В критической же области свойства стекла, как уже отмечалось, изменяются очень сильно и пренебрегать их изменением нельзя.

Так, например, по данным [16, 28, 29, 31], коэффициент термического линейного расширения разных стекол в интервале температур, в котором достаточно быстро протекает релаксация напряжений, в $2,5-4,5$ раза больше коэффициента расширения в интервале $20-120^\circ\text{C}$. Отношение же значений коэффициента температуропроводности в тех же интервалах температур [18, 19] составляет от 1,3 до 1,7.

Это обстоятельство имеет весьма существенное значение при расчете временных напряжений. Напомним, что остаточные напряжения численно равны напряжениям, возникшим вследствие образования перепада температур в начале охлаждения и релаксированным благодаря относительно малой вязкости стекла. Поэтому для расчета остаточных напряжений надо учитывать высокотемпературные значения α и a . Упругие постоянные E и μ также изменяются с изменением температуры, но поскольку нас интересуют напряжения в уже совершенно остывшем стекле, для вычисления коэффициента θ следует брать значения этих постоянных при комнатной температуре.

Принимая отношение $\frac{\alpha}{a}$ при высоких температурах в среднем в 2,2 больше, чем при низких, получим высокотемпературное значение $\theta \approx 60$, $\frac{\theta}{6} \approx 10$.

Таким образом, для расчета остаточных напряжений следует пользоваться формулой

$$P_x = 10h(b^2 - 3x^2). \quad (4''')$$

В задачах, связанных с отжигом стекла, наибольший интерес представляют напряжения в середине пластины и на ее поверхностях. Подставляя в формулу (4') значения $x = 0$ и $x = b$, получим напряжения:

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \pm \frac{\theta}{6} h b^2; \\ P_b &= \mp \frac{\theta}{3} h b^2. \end{aligned} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{на поверхностях} \\ \text{в середине} \end{array} \quad (4a')$$

Следовательно, напряжения на поверхности пластины по абсолютному значению в два раза больше, чем в средней ее плоскости. Знак напряжений P_0 и P_b зависит

Таблица 1

| Тип стекла | Марка стекла | Плотность γ в $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ | Модуль Юнга E в $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \cdot 10^{-9}$ | Коэффициент Пуассона μ | Коэффициент линейного расширения в $1/^\circ\text{C} \cdot 10^{-7}$ | Коэффициент температурной проводимости α в $\frac{\text{см}^2}{\text{мин}}$ | Коэффициент теплового расширения в $1/^\circ\text{C} \cdot 10^{-7}$ | $\frac{\theta}{b}$ |
|---------------------|--------------|---|---|----------------------------|---|--|---|--------------------|
| Легкий крон | ЛК3 | 2,46 | 6440 | 0,228 | 92 | 0,233 | 32,8 | 5,5 |
| Боросиликатный крон | К8 | 2,58 | 8230 | 0,209 | 76 | 0,308 | 25,7 | 4,3 |
| Баритовый крон | БК10 | 3,12 | 7490 | 0,244 | 71 | 0,236 | 29,9 | 5,0 |
| Тяжелый крон | ТК8 | 3,61 | 7800 | 0,266 | 72 | 0,218 | 35,2 | 5,9 |
| Кронфлинт | КФ4 | 2,57 | 7810 | 0,204 | 71 | 0,267 ¹ | 18,6 | 3,0 |
| Баритовый флинт | БФ12 | 3,67 | 6230 | 0,243 | 88 | 0,212 | 34,2 | 5,7 |
| Легкий флинт | ЛФ5 | 3,23 | 5670 | 0,204 | 72 | 0,262 | 19,6 | 3,3 |
| Флинт | Ф1 | 3,57 | 5670 | 0,221 | 74 | 0,247 | 21,8 | 3,6 |
| Тяжелый флинт | ТФ5 | 4,77 | 5530 | 0,244 | 82 | 0,208 | 29,8 | 5,0 |

¹ Коэффициент температуропроводности КФ4 найден исходя из данных для стекол близкого состава.

Таблица 2

1042452

| Тип стекла | Оптические постоянные | | Содержание компонентов в вес. процентах | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-------|---|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|-----|
| | n_D | ν | SiO_2 | B_2O_3 | Al_2O_3 | As_2O_3 | CaO | MgO | BaO | PbO | ZnO | Na_2O | K_2O | F |
| Легкие кроны ЛК Кроны К Баритовые кроны БК | 1,470 | 67,0 | 53,3 | 16,2 | 8,8 | 0,2 | — | — | — | — | — | — | 16,2 | 5,3 |
| | 1,510 | 63,4 | 72,0 | 8,1 | — | 0,2 | 1,5 | 0,5 | — | — | — | 7,2 | 10,4 | — |
| | 1,569 | 56,0 | 49,5 | 4,8 | — | 0,2 | — | — | 21,5 | 2,6 | 12,5 | 1,3 | 7,6 | — |
| | 1,613 | 58,6 | 32,7 | 13,2 | 3,1 | 1,6 | — | — | 45,9 | — | 3,5 | — | — | — |
| Тяжелые кроны ТК Кронфлинты КФ | 1,536 | 51,1 | 63,0 | 1,8 | — | 0,2 | 2,0 | — | — | 16,0 | — | 6,0 | 11,0 | — |
| | 1,626 | 39,1 | 41,8 | — | — | 0,2 | — | — | 11,5 | 33,4 | 5,2 | — | 8,3 | — |
| Баритовые флинты БФ | 1,548 | 45,9 | 61,0 | — | — | 0,2 | — | — | — | 26,3 | — | 4,5 | 8,0 | — |
| Легкие флинты ЛФ | 1,617 | 36,5 | 47,0 | — | — | 0,2 | — | — | — | 46,4 | — | — | 6,4 | — |
| Флинты Ф | 1,755 | 27,5 | 31,6 | — | — | 0,2 | — | — | — | 65,3 | — | — | 2,9 | — |
| Тяжелые флинты Тф | | | | | | | | | | | | | | |

от знака h . Если пластина нагревается, $h > 0$, если охлаждается, $h < 0$. Поэтому при нагревании P_0 положительно, т. е. в средней плоскости имеются напряжения растяжения, а P_b отрицательно, т. е. на поверхностях находятся напряжения сжатия. При охлаждении напряжения имеют знаки, противоположные тем, какие они имели при нагревании.

Подставляя значение $\theta = 27,6$, получим временные напряжения в середине и на поверхностях пластины для среднего стекла:

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \pm 4,6 hb^2; \\ P_b &= \mp 9,2 hb^2. \end{aligned} \right\} \quad (4a'')$$

Подставляя в ту же формулу значение $\theta = 60$, получим остаточные напряжения для среднего стекла в середине (P_0) и на поверхностях (P_b) пластины (эти напряжения имеют такие же знаки, как временные напряжения при нагревании пластины):

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= 10 hb^2; \\ P_b &= -20 hb^2. \end{aligned} \right\} \quad (4a''')$$

При $x = \frac{b}{\sqrt{3}} \approx 0,6b$, т. е. приблизительно на расстоянии $1/3$ полутолщины от поверхностей пластины $P = 0$.

Неограниченный цилиндр. В неограниченном цилиндре действуют три рода главных напряжений: осевые P_0 , радиальные P_r и касательные P_t (рис. 5); эти напряжения выражаются формулами:

$$\left. \begin{aligned} P_t &= \pm \frac{\alpha E h}{8a(1-\mu)} (R^2 - 2r^2); \\ P_r &= \pm \frac{\alpha E h}{16a(1-\mu)} (R^2 - r^2); \\ P_0 &= \pm \frac{\alpha E h}{16a(1-\mu)} (R^2 - 3r^2). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь r — расстояние от рассматриваемой точки до оси цилиндра;

R — радиус цилиндра.

Остальные обозначения те же, что и в случае пластины.

С применением обозначения θ выражения (6) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} P_t &= \pm \frac{\theta}{8} h (R^2 - 2r^2); \\ P_r &= \pm \frac{\theta}{16} h (R^2 - r^2); \\ P_0 &= \pm \frac{\theta}{16} h (R^2 - 3r^2). \end{aligned} \right\} \quad (6')$$

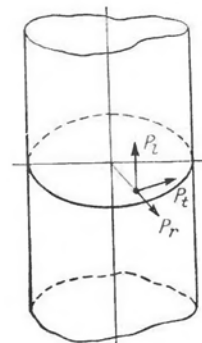


Рис. 5. Напряжения в цилиндре

Массивный шар. В шаре имеют место лишь радиальные и тангенциальные напряжения

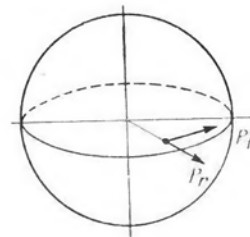


Рис. 6. Напряжения в шаре

(рис. 6), выражающиеся таким образом:

$$\left. \begin{aligned} P_r &= \pm \frac{\alpha E h}{15a(1-\mu)} (R^2 - r^2); \\ P_t &= \pm \frac{\alpha E h}{15a(1-\mu)} (R^2 - 2r^2). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Обозначения величин те же, какие принимались и в случаях пластины и цилиндра. С применением обозначения θ

$$\left. \begin{aligned} P_r &= \pm \frac{\theta}{15} h (R^2 - r^2); \\ P_t &= \pm \frac{\theta}{15} h (R^2 - 2r^2). \end{aligned} \right\} \quad (7')$$

При выполнении числовых расчетов для цилиндра и шара, так же как и для пластины, в зависимости от кон-

кретной задачи выбирается «высокотемпературное» или «низкотемпературное» значение θ . Это относится и ко всем последующим случаям применения коэффициента θ .

4. Краевые напряжения

При нагревании или охлаждении пластины конечных размеров, каковой является заготовка оптического стекла, помимо напряжений параллельных большим поверхностям, возникают также радиальные и тангенциальные (касательные) напряжения в краевой зоне. Эти напряжения образуются в результате того, что в пластине ограниченных размеров теплообмен с окружающим пространством происходит не только через плоские поверхности, но также и через боковую. Поэтому по радиусу заготовки устанавли-

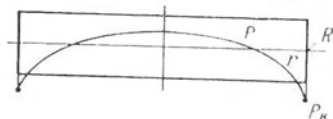


Рис. 7. Распределение тангенциальных напряжений в диске

вается перепад температуры Δt , приводящий к образованию напряжений. Радиальная составляющая напряжения имеет максимальное значение в средней части заготовки и постепенно убывает от середины к краю заготовки, где она становится равной нулю. Тангенциальная составляющая, в противоположность радиальной, максимальное значение имеет на краю заготовки (рис. 7) и убывает к ее середине. При этом она проходит через нуль и меняет знак на обратный. По абсолютной величине значения тангенциальной составляющей в середине заготовки значительно меньше, чем на краю. Если заготовка в начале охлаждения была в пластичном состоянии, то после того, как она примет комнатную температуру, в ее краевой зоне возникнут остаточные напряжения, называемые «краевыми» или «эффектом края».

Е. Э. Данюшевский [10, 11] показал, что в пластине конечных размеров, имеющей форму плоского диска и обладающей изотермической поверхностью, краевое напряжение на краю пластины равно напряжению на плоской поверхности

$$P_k = P_\theta = -\frac{\theta}{3} hb^2.$$

Следовательно, для «среднего» стекла краевые напряжения будут равны: временные при нагревании и охлаждении

$$P'_k = \mp 9,2hb^2; \quad (8)$$

остаточные

$$P'_k = -20hb^2. \quad (8')$$

Если по радиусу печи, в которой производится охлаждение или нагревание диска, имеется перепад температуры и если при этом оси печи и диска совпадают, то и по радиусу поверхности диска возникает соответствующий перепад температуры, который обозначим $\Delta t'$. В этом случае, как показано Данюшевским [11], в диске появляются дополнительные радиальные и тангенциальные напряжения.

Так же, как и основные, дополнительные радиальные напряжения на краю равны нулю, тангенциальные же — на краю имеют максимальное значение

$$P'_k = -\frac{(1-\mu)E\alpha}{(1-2\mu)^2} \Delta t', \quad (9)$$

или, если ввести обозначение

$$\frac{(1-\mu)E\alpha}{(1-2\mu)^2} = G,$$

$$P'_k = -G \Delta t'. \quad (9')$$

Полное краевое напряжение равно

$$P_k = P'_k + P_k = -\left(\frac{\theta}{3} hb^2 + G \Delta t'\right). \quad (10)$$

Подставляя в формулу (9) свойства среднего стекла $E = 6,6 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$, $\mu = 0,20$ и $\alpha = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, Данюшевский нашел для коэффициента G среднее значение 3,6. Для стекол, приведенных в табл. 1, значение этого коэффициента изменяется в пределах от 3,0 до 4,4.

Однако это среднее и индивидуальные (истинные) значения коэффициента G пригодны для расчета временных краевых напряжений, возникающих при равномерном нагревании или охлаждении стекла в области температур, лежащих ниже критической области.

Для расчета остаточных краевых напряжений следует брать коэффициент расширения, в среднем в 3,2 раза

больше указанного выше, т. е. $\alpha' = 255 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Тогда коэффициент G приблизительно будет равен 11 и формула (9) примет вид

$$P_K'' = -11\Delta t'. \quad (9'')$$

Полное остаточное краевое напряжение в диске, охлаждавшемся с перепадом температуры $\Delta t'$, на поверхности равно

$$P_K = P_K' + P_K'' = -(20hb^2 + 11\Delta t'). \quad (10a)$$

5. Двойное лучепреломление

Под действием напряжений как внешних, так и внутренних стекло становится анизотропным, двоякопреломляющим. Если на стекло перпендикулярно направлению распространения луча действуют два взаимно перпендикулярных напряжения P_x и P_y (рис. 8), то двойное лучепреломление (δn) выражается уравнением

$$\delta n = B(P_x - P_y). \quad (11)$$

Напряжения, действующие на стекло в направлении распространения луча, если таковые и имеются, не вызывают двойного лучепреломления. Коэффициент пропорциональности B носит название оптического коэффициента напряжений или упруго-оптического коэффициента и выражается в $\text{см}^2/\text{кг}$.

Рис. 8. Схема возникновения двойного лучепреломления

Он называется также коэффициентом Брюстера. Если в формуле (11) δn выражено в $\text{нм}/\text{см}$, а P — в $\text{кг}/\text{см}^2$, то B будет выражаться в $\text{нм} \cdot \text{см}/\text{кг}$ или в брюстерах.

Если в какой-либо точке тела одно из напряжений, входящих в формулу (11), равно нулю, например, напряжение, действующее в направлении, перпендикулярном поверхностям тонкой пластинки (рис. 2), или радиальное напряжение P_R на боковой поверхности цилиндра [рис. 5; в формуле (6) при $r = R$, $P_R = 0$], то δn будет пропорционально напряжению, действующему в другом направлении, и может служить его мерой:

$$\delta n = BP. \quad (11a)$$

Двойное лучепреломление в стекле измеряется с помощью несложных методов и простых приборов.

Обычно для расчетов по отжигу пользуются формулами, в которых напряжения выражены двойным лучепреломлением. Чтобы их получить, нужно обе части уравнений (4)—(4''), (4a)—(4a''), (6), (7), (8), (8'), (9), (9''), (10) и (10a) умножить на коэффициент B , например

$$\left. \begin{aligned} \delta n_0 &= \pm \frac{B\theta}{6} hb^2; \\ \delta n_s &= \mp \frac{B\theta}{3} hb^2, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\delta n_K = \delta n_K + \delta n_K'' = -\left(\frac{B\theta}{3} hb^2 + BG\Delta t'\right). \quad (13)$$

Коэффициент Брюстера B зависит от состава стекла и значения его для различных стекол каталога изменяются. Для кронов они лежат в пределах от 2,5 до 3,7, для тяжелых флинтос — от 0,7 до 2,0 брюстеров. Максимальное значение $B = 3,9$ брюстера имеет стекло ОФ1. У сверхтяжелых флинтос B отрицателен, например у СТФ1 $B = -1,9$ брюстера.

Стекла типов БК, ТК, КФ, БФ и Ф по значениям B являются промежуточными между кронами и тяжелыми флинтами.

В табл. 3 приведены значения коэффициента B и коэффициентов $\frac{B\theta}{6}$, $\frac{B\theta}{3}$ и BG в формулах (12) и (13) для стекол, указанных в табл. 1. Значения B заимствованы из работы Е. Е. Березиной [4].

Приняв значение $B = 2,8 \text{ нм} \cdot \text{см}/\text{кг}$ в качестве среднего для оптических стекол, можно получить вышеуказанным путем формулы для расчета остаточного двойного лучепреломления в диске с плоскими поверхностями:

в середине пластины

$$\left. \begin{aligned} \delta n_0 &= 28hb^2; \\ \delta n_s &= -56hb^2; \end{aligned} \right\} \quad (12')$$

краевые

$$\delta n_K = -(56hb^2 + 31\Delta t'). \quad (13')$$

Таблица 3

| Марка стекла | Коэффици- ент Брюстера B , нм·см/кг | $B0/6$ | | $B0/3$ | | BG | |
|-----------------|--|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | | Напряжения | | | | | |
| | | вре- мен- ные | оста- точные | вре- мен- ные | оста- точные | вре- мен- ные | оста- точные |
| ЛКЗ | 2,8 | 15,5 | 28 | 31 | 56 | 12 | 22 |
| К8 | 2,7 | 11,5 | 25 | 23 | 50 | 11,5 | 37 |
| БК10 | 2,9 | 14,5 | 26 | 29 | 52 | 11,5 | 32 |
| ТК8 | 2,0 | 12 | 24 | 24 | 48 | 9 | 34 |
| КФ4 | 2,9 | 8,5 | 16 | 17 | 32 | 9,5 | 29 |
| БФ12 | 2,5 | 14 | 21 | 28 | 42 | 11,5 | 17 |
| ЛФ5 | 3,2 | 10,5 | 16 | 21 | 32 | 9,5 | 21 |
| Ф1 | 2,9 | 10,5 | 13 | 21 | 26 | 8,5 | 15 |
| ТФ5 | 1,2 | 6 | 8 | 12 | 16 | 4 | 8,5 |

Примечание. Коэффициенты для расчета остаточных напряжений подсчитаны на основе приближенных значений коэффициентов линейного расширения α и температуропроводности a для области отжига.

Примечание. Коэффициенты для расчета остаточных напряжений подсчитаны на основе приближенных значений коэффициентов линейного расширения α и температуропроводности a для области отжига.

Данные табл. 3 показывают, насколько сильно у разных стекол отличаются от средних значений коэффициенты $\frac{B0}{6}$, $\frac{B0}{3}$, BG , связывающие двойное лучепреломление в разных точках стеклянного диска с его толщиной. Поэтому для точных расчетов двойного лучепреломления в зависимости от скорости охлаждения и толщины заготовки определенного стекла следует пользоваться коэффициентами, свойственными этому стеклу.

6. Релаксация напряжений

Закономерности, которым подчиняется релаксация напряжений в стекле в критической области, были изучены Адамсом и Вильямсоном [26]. Они установили, что в верхней части этой области зависимость ослабления напряжений от времени выражается формулой

$$\frac{1}{\delta n_{\tau}} - \frac{1}{\delta n_0} = A\tau. \quad (14)$$

Постоянная

$$A = 10^{M_1 t - M_2}, \quad (15)$$

или

$$\lg A = M_1 t - M_2, \quad (15a)$$

где M_1 и M_2 — параметры, значения которых зависят от состава стекла. Коэффициент M_1 при t численно равен температурному коэффициенту текучести и изменяется незначительно, тогда как значения M_2 изменяются в больших пределах. Значения M_1 и M_2 , определенные Адамсом и Вильямсоном для некоторых типовых стекол, приведены в табл. 4.

Таблица 4

| Тип стекла | | M_1 | M_2 |
|------------------------|--------------------|-------|-------|
| по Адамсу и Вильямсону | по ГОСТу 3514—67 | | |
| Боросиликатный крон | Крон | 0,030 | 18,68 |
| Крон обыкновенный | Крон | 0,029 | 17,35 |
| Легкий баритовый крон | Баритовый крон | 0,032 | 20,10 |
| Тяжелый баритовый крон | Тяжелый крон | 0,038 | 24,95 |
| Баритовый флинт | Баритовый флинт | 0,028 | 16,28 |
| Легкий флинт | Легкий флинт | 0,033 | 15,92 |
| Средний флинт | Флинт | 0,038 | 18,34 |
| Тяжелый флинт | Тяжелый флинт | 0,037 | 17,51 |
| Очень тяжелый флинт | Сверхтяжелый флинт | 0,033 | 15,31 |

Из таблицы видно, что параметр M_1 в среднем приблизительно равен 0,03.

Другие исследователи, изучавшие на ряде стекол процесс релаксации напряжений, предлагали для его выражения иные уравнения, которые лучше отвечали экспериментальным данным, чем формула Адамса и Вильямсона. Однако вследствие большей их сложности, они не получили распространения.

7. Структурные изменения показателя преломления стекла в критической области

В п. 1 уже было отмечено, что характер изменения свойств стекла в зависимости от температуры в критической области заметно отличается от характера их температурной зависимости в соседних областях.

Как уже отмечалось, это различие для разных свойств имеет разный характер: одни в этой области сильно возрастают, другие, наоборот, также сильно уменьшаются. Общим для всех свойств является то, что в критической области температурный коэффициент свойства во много раз превышает его температурный коэффициент при более низких и более высоких температурах.

Второй общей чертой является то, что температурная зависимость свойства может несколько изменяться — не получается полной воспроизводимости его значений при нагревании и охлаждении стекла. Это расхождение тем больше, чем больше скорость нагревания и охлаждения стекла в критической области. При уменьшении скорости нагревания и охлаждения кривые изменения свойства сближаются между собой, стремясь к некоторой промежуточной предельной кривой, называемой «равновесной». Если стекло быстро охладить из жидкого состояния и нагреть от нормальной температуры до критической области и затем выдерживать при постоянной температуре, то его свойства будут изменяться сначала быстро, потом все медленнее, стремясь к равновесному значению, т. е. к одной из точек равновесной кривой. Этот процесс, связанный со структурными преобразованиями в стекле, протекает тем быстрее, чем выше температура. Все эти явления свойственны и показателю преломления. Систематическое изучение изменений показателя преломления в критической области впервые было проведено А. А. Лебедевым [17] на боросиликатном стекле. Он нашел, что изменение показателя преломления в этой области состоит из двух составляющих: чисто температурной и структурной, связанной со структурными преобразованиями в стекле.

Структурные изменения могут достигать нескольких единиц третьего десятичного знака. Лебедев установил также, что равновесная линия показателя преломления представляет собой прямую линию, и выдвинул гипотезу о природе структурных изменений свойств стекла в критической области.

На рис. 9 схематически показаны кривые изменения показателя преломления стекла с понижением температуры при различной скорости его охлаждения. При очень малой скорости охлаждения, обозначенной h_0 , показатель преломления стекла при каждой температуре достигает равновесного значения и потому все время следует за равновесной прямой.

Так продолжается до нижней границы критической области, ниже которой структурные изменения практически прекращаются. В процессе дальнейшего охлаждения стекла изменение показателя преломления происходит только в соответствии с его температурным коэффициентом. Эта кривая приводит к значению n_0 при комнатной температуре.

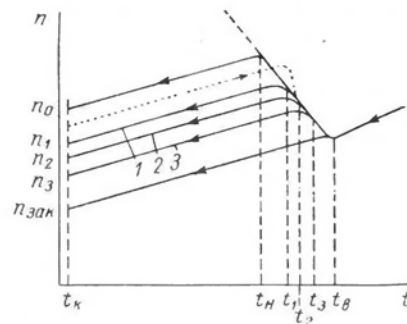


Рис. 9. Изменение показателя преломления n : — при нагревании; — при охлаждении стекла со скоростью h ; $h_0 > h_1 > h_2 > h_3 > h_{зак}$

При более быстром охлаждении стекла, например со скоростями h_1, h_2, h_3 , структурные изменения показателя преломления не успевают завершаться в нижней части критической области. Начиная от некоторой температуры (t_1, t_2, t_3), которая тем выше, чем больше скорость охлаждения стекла, скорость изменения показателя преломления до равновесного значения становится меньше скорости охлаждения. С понижением температуры показатель преломления уже не успевает достигать соответствующих равновесных значений и поэтому его последовательные

значения располагаются ниже равновесной прямой, образуя кривые 1, 2, 3. Эти кривые по охлаждению стекла до комнатной температуры дают значения показателя преломления n_1, n_2, n_3 меньшие, чем n_0 .

При очень большой скорости охлаждения стекла, например при его закалке, кривая изменения показателя преломления почти не меняет своего хода в критической области и приводит к наиболее низкому при комнатной температуре значению $n_{зак}$. При нагревании стекла, предварительно медленно охлажденного, значения показателя преломления в критической области вначале бывают выше равновесных (пунктирная линия), но при дальнейшем нагревании они быстро достигают равновесного значения.

А. И. Стожаров [20] развил работы А. А. Лебедева. Он изучил для оптических стекол шести марок ход равновесных прямых показателя преломления. Он исследовал также изменение показателя преломления стекла в зависимости от времени его выдерживания при разных температурах в критической области. Им были найдены эмпирические уравнения, связывающие изменение отклонения Δn показателя преломления от равновесного значения с температурой стекла t и временем выдерживания стекла при постоянной температуре:

$$\lg \frac{\Delta n_\tau}{\Delta n_0} = -A'\tau \quad (16)$$

и

$$\frac{1}{\Delta n_\tau} - \frac{1}{\Delta n_0} = A\tau, \quad (16a)$$

где Δn_0 — начальное отклонение показателя преломления от равновесного значения (в момент $\tau = 0$);

Δn_τ — отклонение в момент времени τ ;

A' и A — постоянные, зависящие от температуры.

Уравнение (16) более подходит для низких, а уравнение (16a) — для высоких температур. Зависимость постоянных A и A' от температуры выражается формулами:

$$A' = 10^{K't-L'} \quad (17)$$

и

$$A = 10^{K''-L''} \quad (17a)$$

Изменение Δn в зависимости от времени τ при разных температурах для боросиликатного крона показано на рис. 10.

В. А. Флоринская [24] весьма тщательно изучила изменение показателя преломления стекол БК10 и Ф1 в широком интервале температур. Наблюдая за изменением разности Δn в течение больших промежутков времени, она установила, что это изменение подчиняется более сложной зависимости, чем те, которые представлены уравнениями (16) и (16a). Найденная зависимость выражается суммой нескольких гиперболических и экспоненциальных функций.

Такая сложная зависимость указывает на то, что и сам процесс структурного изменения показателя преломления является весьма сложным и состоит из нескольких одновременно или последовательно протекающих процессов.

Поскольку уравнения, найденные для стекол БК10 и Ф1, очень сложны и нахождение аналогичных уравнений для стекла других марок требует проведения специального длительного и трудоемкого исследования, для практических целей пользуются приближенными формулами Стожарова (16) и (16a), имеющими универсальный для всех стекол характер. Значения параметров K', L', K и L , необходимых для вычисления величин A' и A , найденные А. И. Стожаровым для стекла 6 типовых марок, приведены в табл. 5.

Весьма существенным свойством стекла, зависящим от его химического состава, является прирост показателя преломления в критической области при изменении температуры на 1°C (температурный коэффициент показателя преломления), характеризуемый угловым коэффициентом

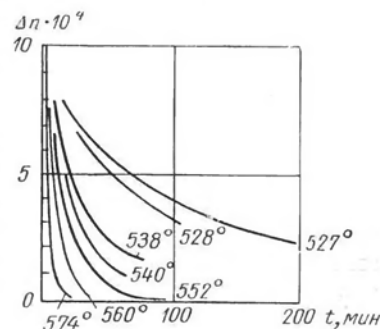


Рис. 10. Изменение Δn показателя преломления стекла типа крона во время выдержки при разных температурах

Т а б л и ц а 5

| Тип стекла | Марка стекла | | K' | L' | K | L |
|---------------------|--------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Боросиликатный крон | K17 | (C1) | 0,031 | 18,67 | 0,040 | 19,67 |
| Баритовый крон | БК7 | (C4) | 0,030 | 18,14 | 0,039 | 20,25 |
| Тяжелый крон | ТК2 | (C6) | 0,023 | 15,27 | 0,024 | 12,30 |
| Баритовый флинт | БФ5 | (C2) | 0,032 | 19,55 | 0,032 | 15,88 |
| Баритовый флинт | БФ7 | (C5) | 0,036 | 20,70 | 0,042 | 20,13 |
| Флинт | Ф4 | (C3) | 0,028 | 15,12 | 0,028 | 11,45 |

Примечание. В скобках указано старое обозначение марок стекла.

равновесной прямой. Этот угловой коэффициент был определен для большого числа стекол И. И. Гребенниковым, Н. А. Филипповым, С. В. Чисовой [8] и другими исследователями. Эти значения были указаны в ГОСТах 3514 издания 1951 г. Некоторые из них приводятся ниже.

| Марка стекла | К2 | К8 | БК6 | БК10 | ТК2 | ТК8 | КФ3 | БФ7 | БФ8 |
|--------------------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\beta \cdot 10^5$ | 4,0 | 4,2 | 3,0 | 5,0 | 3,6 | 5,2 | 3,2 | 3,4 | 1,9 |
| Марка стекла | БФ12 | БФ13 | ЛФ5 | ЛФ7 | Ф1 | ТФ1 | ТФ4 | ТФ5 | ОФ1 |
| $\beta \cdot 10^5$ | 2,7 | 5,6 | 2,4 | 2,0 | 2,5 | 3,2 | 5,4 | 3,8 | 2,1 |

Из данной таблицы видно, что высокие значения β имеют боросиликатные кроны, баритовые кроны, тяжелые кроны, а также некоторые баритовые и тяжелые флинт. В большинстве случаев это стекла, имеющие в своем составе борный ангидрид (B_2O_3). Флинты и легкие флинты отличаются низким значением β . Из новых стекол, включенных в каталог оптических стекол в течение последних лет, очень высоким температурным коэффициентом показателя преломления в критической области обладают многоборные стекла типов СТК, ТБФ, ОФ титановые флинты, фосфатные кроны ФК и некоторые другие.

Изменение показателя преломления стекла при охлаждении последнего в критической области ранее было схематически представлено так (рис. 9), что вначале показатель преломления точно следует равновесной прямой, а затем начинает отклоняться. В действительности этот процесс происходит несколько иначе. А. А. Лебедев [17] экспериментально показал, что при охлаждении или нагревании в критической области стекла, доведенного до

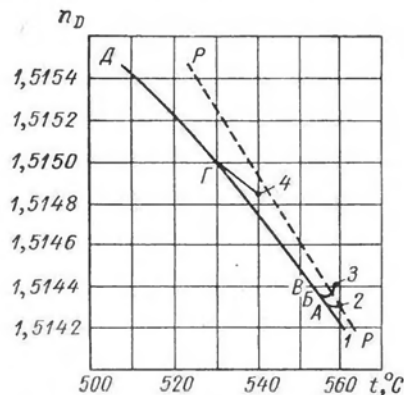


Рис. 11. Равновесная кривая показателя преломления n_D боросиликатного крона

равновесного состояния, его показатель преломления в первые моменты времени следует в основном чисто температурному изменению; с дальнейшим изменением температуры, по мере удаления показателя преломления стекла от равновесного значения, начинает действовать механизм структурных преобразований, который заставляет показатель преломления приближаться к равновесной прямой.

Позднее Е. Э. Данюшевский [10] вычислил и построил кривые (рис. 11) изменения показателя преломления стекла (боросиликатного крона) при постоянной скорости охлаждения 4°C/ч в критической области. При этом он выбрал такие начальные температуры, при которых скорость структурных изменений достаточно велика (она не меньше скорости охлаждения).

Е. Э. Данюшевский вычислил изменение показателя преломления для четырех случаев положения его относительно

равновесной прямой. В первых трех (точки 1—3) охлаждение начинается от 560°, а в четвертом — от 540° С. В первом случае (точка 1) показатель преломления на $10 \cdot 10^{-5}$ единиц больше его равновесного значения при $t = 560^\circ$; во втором (точка 2) — он почти равен равновесному и в третьем (точка 3) — на $10 \cdot 10^{-5}$ меньше его. В четвертом случае показатель преломления меньше равновесного значения при $t = 540^\circ$ на $10 \cdot 10^{-5}$. Наибольшая же разность показателей преломления (между случаями четвертым и первым) составляет около $65 \cdot 10^{-5}$. Кривые изменения показателей преломления во всех четырех случаях (1—А, 2—В, 3—В и 4—Г) сначала идут раздельно. В этой части их ход является результатом взаимодействия температурных и структурных изменений показателя преломления. Затем все кривые постепенно сливаются в одну АБВГ. Она вначале идет параллельно равновесной прямой, отступая от нее примерно на $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$, а затем начинает постепенно все более отдаляться. Кривую изменения показателя преломления Данишевский называл «равновесной». В отличие от равновесной прямой, равновесная кривая является линией динамического равновесия температурных и структурных изменений показателя преломления стекла. Равновесная кривая однозначно зависит от скорости охлаждения: разным скоростям охлаждения соответствуют различные равновесные кривые. Таким образом, если равновесная прямая у стекла одна, то равновесных кривых может быть много.

Таким образом, если стекло равномерно охлаждается от достаточно высокой температуры, при которой скорость структурных изменений показателя преломления того же порядка, что и скорость охлаждения (чем выше температура, тем больше может быть скорость охлаждения), то его показатель преломления при комнатной температуре не будет зависеть ни от начальной температуры, ни от начального показателя преломления, он будет зависеть только от скорости охлаждения.

Данишевский [10] дал уравнение, выражающее зависимость показателя преломления n от скорости охлаждения h

$$n = -\frac{\beta}{K} \lg h + u. \quad (18)$$

Здесь β — коэффициент изменения показателя преломления, вызываемый только структурными превращениями;
 K — постоянная из уравнения (17а) Стожарова, зависящая от состава стекла;
 u — постоянная, зависящая от свойств стекла данной варки.

Обозначив $\frac{\beta}{K}$ буквой m , получим

$$n = -m \lg h + u. \quad (18')$$

Коэффициент m может быть определен непосредственно опытным путем, если в образцах стекла, охлажденных со скоростями h_1 и h_2 , измерить соответствующие n_1 и n_2 .

Приводим значения m для некоторых стекол:

| Марка стекла | ЛКЗ | К8 | БК10 | ТК8 | ТК14 | КФ6 | БФ13 | ЛФ6 | Ф1 | ТФ7 | ОФ1 | ОФ3 |
|----------------|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| $m \cdot 10^4$ | 8,1 | 9,4 | 9,4 | 9,2 | 12,5 | 4,8 | 7,3 | 3,7 | 4,3 | 5,4 | 5,4 | 23,2 |

Если одно и то же стекло охлаждать с разными скоростями h_1 и h_2 , то возникающая вследствие этого разность показателей преломления Δn будет равна

$$\Delta n = n_1 - n_2 = m \lg \frac{h_2}{h_1}. \quad (19)$$

Это в одинаковой мере относится и к случаю, когда один кусок стекла последовательно нагревают, а затем охлаждают с разной скоростью, и к случаю, когда две части одного куска стекла одновременно охлаждают с разной скоростью.

Влияние разной скорости охлаждения проявляется только в критической области. При более низких температурах, с какой бы скоростью стекло ни охлаждалось, его конечный показатель преломления практически не зависит от скорости охлаждения.

Из зарубежных исследователей, занимающихся изучением изменения показателя преломления, в зависимости от температуры в критической области следует отметить А. Винтера, Л. Продома и Г. Ретгера.

Наиболее интересный и новый материал дает большая работа Л. Продома [29]. Он исследовал изменение показателя преломления, плотности и удельной рефракции ряда простых (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5), бинарных и многокомпонентных стекол.

Работы А. Винтер [35], Ретгера и Безена [33], по существу, ничего нового не вносят по сравнению с работами отечественных ученых.

8. Изменение дисперсии в критической области

Изменения показателя преломления стекла, происходящие при его нагревании в критической области, неодинаковы для лучей с разной длиной волны; следовательно, в этой области изменяется и дисперсия. Впервые изменение дисперсии в зависимости от температуры было обнаружено еще в прошлом столетии. Однако первое подробное изучение этого вопроса было выполнено П. Я. Бокиным [5], который исследовал изменение показателя преломления стекла для различных спектральных линий от n_g до n_c при его закалке. Среди изученных стекол были: боросиликатный крон, три баритовых крона и три флинта. Результаты, полученные Бокиным, показали, что при изменениях показателя преломления, достигавших $25 - 30 \cdot 10^{-4}$, изменения общей дисперсии ($n_g - n_c$) не превышают $0,8 \cdot 10^{-5}$.

В. А. Флоринская [24] провела обстоятельное исследование изменения дисперсии ($n_g - n_c$) оптических стекол разных групп и различного химического состава: боросиликатного крона К8, баритового крона БК10, тяжелого крона ТК5, флинтов Ф1 и Ф2 и тяжелых флинтов ТФ1, ТФ3 и ТФ5. Исследование проводилось в широком температурном интервале $100 - 300^\circ$. При этом максимальное изменение дисперсии $\Delta(n_g - n_c)$ стекла К8 при температурах выдержки, отклоняющихся от температуры отжига на $\pm 60^\circ$, составило $1 - 3 \cdot 10^{-5}$. Соответствующие изменения дисперсии ($n_g - n_c$) стекол БК10 и ТК5 не превышали точности метода измерения $-3 \cdot 10^{-6}$. Заметное изменение дисперсии было выявлено у флинтов. Так, при изменении температуры выдержки стекла на $\pm 20 - 30^\circ$ изменение дисперсии достигало: у Ф1 и Ф3 $-4 \cdot 10^{-5}$, у ТФ1 $-3 \cdot 10^{-5}$, у ТФ3 $-6 \cdot 10^{-5}$ и у ТФ5 $-9 \cdot 10^{-5}$. При этом с повышением температуры выдержки дисперсия возрастала, а с понижением — уменьшалась.

В последние годы значительное изменение дисперсии в зависимости от температуры выдержки и скорости охлаждения было обнаружено у стекол типа СТФ и ТБФ и некоторых титаносодержащих легких, средних и тяжелых флинтов [6].

9. Неоднородность стекла и ее происхождение. Физическая неоднородность 1 и 2-го рода

Ранее уже отмечалось, что основным качеством оптического стекла является его оптическая однородность. Под однородностью стекла понимается такое качество, при котором все его участки и отдельные их точки имеют одинаковый показатель преломления. Отступление от полного равенства показателей преломления, т. е. наличие в стекле участков, отличающихся по показателю преломления друг от друга или от основной его массы, называется оптической неоднородностью. Конкретные виды и формы неоднородности, встречающиеся в оптическом стекле, называются «неоднородностями».

Неоднородности в оптическом стекле делятся на две основных группы: химические и физические.

Химическими неоднородностями называют участки стекла, отличие которых от соседних по показателю преломления вызвано небольшим различием в химическом составе. К неоднородностям этого вида относятся различные тонкие и грубые одиночные свили, их потоки и целые слои. Химические неоднородности возникают в процессе варки стекла. Они ослабевают и частично устраняются путем его размешивания. Химические неоднородности не претерпевают заметных изменений в процессе отжига и в дальнейшем нами рассматриваться не будут.

Физические неоднородности образуются в стекле однородного химического состава и вызываются чисто физическими причинами. Различают физические неоднородности 1 и 2-го рода.

Физические неоднородности 1-го рода происходят от того, что разные участки куска стекла по тем или иным причинам охлаждаются в области отжига с разной скоростью и изменение их показателей преломления протекает по разным равновесным кривым. Причинами неодинаковой скорости охлаждения разных участков стекла могут быть: неблагоприятные условия отжига стекла,

приводящие к возникновению больших градиентов температуры в нем, неправильно заданная, слишком большая скорость его охлаждения и др. Подробнее они будут рассмотрены в гл. V.

Так как обычно охлаждение стекла начинается с поверхности и в начальный период скорость охлаждения поверхности больше, чем скорость охлаждения середины, то неоднородности 1-го рода характеризуются тем, что показатель преломления поверхностных слоев меньше, чем внутренних.

Физические неоднородности 2-го рода являются следствием упругих деформаций стекла, возникающих под действием остаточных напряжений. Рассмотрим механизм образования неоднородностей 2-го рода на примере, представляющем для нас интерес, а именно, на примере краевых напряжений в диске.

Напряжения, приложенные к любой точке плоскопараллельного диска, можно свести к двум главным составляющим: радиальной — P_r и тангенциальной — P_t . Напряжения P_r и P_t вызывают соответствующие деформации стекла, которые приводят к изменению его показателя преломления на Δn_r в радиальном и на Δn_t в тангенциальном направлениях. Эти изменения показателя преломления связаны с соответствующими напряжениями

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_t &= n_t - n = C_1 P_t + C_2 P_r, \\ \Delta n_r &= n_r - n = C_1 P_r + C_2 P_t, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 называются фотоупругими постоянными стекла; они выражаются в $\text{см}^2/\text{кг}$.

Фотоупругие постоянные почти у всех стекол отрицательны, причем по абсолютному значению $|C_1| < |C_2|$. Лишь у сверхтяжелых флинтосов $|C_1| > |C_2|$. Разность $C_1 - C_2$ равна коэффициенту Брюстера B .

На самом краю диска радиальная составляющая остаточных напряжений $P_{(r=R)} \approx 0$, а тангенциальная P_t имеет отрицательный знак (сжимающие напряжения). Поэтому выражения (20) на краю диска примут вид

$$\Delta n_t = C_1 P_t > 0$$

$$\Delta n_r = C_2 P_t > 0.$$

Для большинства стекол неоднородность 2-го рода определяется изменением показателя преломления Δn_r ,

поскольку оно больше, чем Δn_t . Так как Δn_r и Δn_t имеют положительный знак, показатель преломления на краю больше, чем в середине диска.

Точное значение неоднородностей 2-го рода Δn можно вычислить по следующей формуле, выведенной Данюшевским:

$$\Delta n_r = (\Delta n_r)_{r=R} - (\Delta n_r)_{r=0} = \frac{1}{B} \left(\frac{3C_2 - C_1}{2} \delta n_{кр} - 2C_2 \delta n \right), \quad (21)$$

где $\delta n_{кр}$ — двойное лучепреломление на краю в $\text{нм}/\text{см}$; δn — двойное лучепреломление по диаметру диска в середине его толщины в $\text{нм}/\text{см}$;

B — коэффициент Брюстера в $\text{нм} \cdot \text{см}/\text{кг}$.

Неоднородности 1-го рода называются структурными, а неоднородности 2-го рода можно назвать фотоупругими.

10. Температура отжига

Как было сказано в пп. 6 и 7, оба процесса — стремление показателя преломления к его равновесному значению и релаксация напряжений — могут происходить при любой температуре в критической области; однако при разных температурах эти процессы протекают с различной скоростью, изменяющейся в степенной зависимости от температуры.

Следовательно, теоретически при любой температуре в критической области стекло можно привести к такому состоянию, когда в нем будут отсутствовать неоднородности и двойное лучепреломление, или, как говорят, отжечь его. Это значит, что, по существу, нельзя говорить о температуре отжига стекла, как о некоей физической постоянной.

По предложению Л. Адамса и Е. Вильямсона [26] за температуру отжига условились принимать такую температуру, при которой в течение двух минут релаксируется около 95% напряжений, имеющихся в стекле. Позднее было установлено, что такая скорость релаксации напряжений соответствует вязкости стекла 10^{13} пз. Поэтому сейчас температуру отжига стекла принято определять как температуру, отвечающую его вязкости $\eta = 10^{13}$ пз. Такое определение понятия «температура отжига» является более точным и объективным. Обозначим эту температуру t_{13} .

В производственных условиях в зависимости от требований, предъявляемых к стеклу, и некоторых практических соображений, температура, при которой производится отжиг заготовок стекла той или иной марки, может несколько отличаться от температуры, соответствующей вязкости 10^{13} лз, отклоняясь от нее в сторону более высоких или низких температур. Указанные отклонения вызываются следующими причинами. Многие стекла разных марок, даже разного химического состава, имеют достаточно близкие температуры отжига, разница между которыми не превышает 5—15° С. В то же время заготовки из стекла этих марок заказываются и выпускаются в малых весовых количествах, далеко не достаточных для заполнения даже самой малой по вместимости из производственных печей отжига. Пускать печь отжига не полностью загруженной не рентабельно. Кроме того, недогруженная печь имеет в различных своих участках различную теплоемкость, что неблагоприятно сказывается на распределении температур по печи и на температурном режиме в процессе отжига. Поэтому для стекла нескольких марок с близкими температурами отжига принимают некоторую единую, среднюю между ними температуру, что позволяет заготовки стекла всех этих марок отжигать одновременно в одной печи при полной ее загрузке. Например, ряд кронов и стекол других типов отжигают при температуре 560° С; для многих тяжелых кронов принимается температура отжига, равная 630°, а для средних флинтгов — 450° С и т. д.

Температуру отжига, принятую в производстве для стекла той или иной марки, будем называть «практической» температурой отжига t_n в отличие от температуры отжига, характеризуемой вязкостью 10^{13} . Проведение отжига при t_n вместо t_{13} , не сказывается на качестве отжига, поскольку в производственных режимах приняты достаточно длительные выдержки стекла при температуре t_n , вполне обеспечивающие приобретение им необходимой однородности, даже если эта температура на 5—15° ниже t_{13} .

11. Область отжига и ее границы

Интервал температур, в котором можно производить отжиг стекла и в котором с той или иной скоростью, даже очень малой, протекают процессы релаксационных

и структурных изменений, называется областью температур отжига или областью отжига.

В действительности не существует определенных, четко выраженных температурных границ области отжига. Переход от области отжига к областям более высоких и более низких температур происходит постепенно, т. е. область отжига ограничивается некоторыми переходными температурными интервалами. Однако в практических целях эти интервалы удобно характеризовать определенными значениями для выделения области температур, в пределах которых релаксационные процессы и структурные изменения могут существенно отразиться на качестве отжига по оптической однородности и двойному лучепреломлению.

В качестве верхней границы, которую обозначим t_n , обычно принимают температуру отжига t_{13} , т. е. $t_n = t_{13}$. Поскольку при этой температуре релаксационный процесс в основном заканчивается в течение двух минут, то при более высоких он будет протекать практически мгновенно.

В качестве нижней границы области отжига должна служить температура, соответствующая достаточно большой вязкости, при которой релаксация напряжений и структурные изменения показателя преломления практически отсутствуют.

На основании изучения скорости релаксации напряжений в различных стеклах Адамс и Вильямсон [26] пришли к заключению, что для среднего стекла интервал температур отжига можно принять равным 150° С, считая от верхней его границы.

Данюшевский [10] вычислил, что в этом 150-градусном интервале для среднего стекла вязкость изменяется на 4,5 порядка. Следовательно, нижней границе области отжига отвечает вязкость стекла $\eta_n = 10^{17,5}$. Расчет был выполнен исходя из предположения, что у среднего стекла во всей области отжига при понижении температуры на каждые 10° С вязкость увеличивается в два раза, т. е. исходя из предположения о линейной зависимости вязкости от температуры.

В действительности зависимость вязкости от температуры более сложна. Было установлено [30, 36], что у оптических, как и у других стекол, логарифм вязкости в области отжига линейно зависит от величины, обратной

абсолютной температуре T (рис. 12):

$$\lg \eta = \frac{K_1}{T} + K_2, \quad (22)$$

где K_1 и K_2 — постоянные, зависящие от состава стекла.

Исходя из этой зависимости вязкость среднего стекла в 150-градусном интервале температуры должна измениться не на 4,5, а на 5,5 порядков:

$$\lg \eta_n - \lg \eta_0 = 5,5.$$

Следовательно, $\lg \eta_n = 18,5$, а не 17,5 (индексами n и 0 обозначены вязкости, соответствующие температурам t_n и t_0).

Чтобы найти температуру нижней границы t_n области отжига стекла, необходимо определить зависимость изменения его вязкости от температуры до значений $\eta = 10^{18} - 10^{19}$ пз и с помощью этой зависимости найти температуру, соответствующую вязкости $10^{18,5}$ пз.

Непосредственных экспериментальных данных определения вязкости стекол, превышающей 10^{13} пз, нет. Поэтому их температура при вязкости $\eta = 10^{18,5}$ пз может быть получена лишь путем линейной экстраполяции $\lg \eta$ в зависимости от $\frac{1}{T}$, исходя из результатов измерения вязкости $10^9 - 10^{13}$ пз. Следует отметить, что, по данным М. Продом [30], зависимость $\lg \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$ у некоторых стекол при вязкостях более $\eta = 10^{16}$ пз отклоняется от прямолинейного хода в сторону больших значений $\frac{1}{T}$ (рис. 12 — пунктирная кривая), т. е. в сторону меньших

значений T . Поэтому полученные экстраполяцией значения $T_{18,5}$ температуры целесообразно округлять в сторону меньших ее значений. Автором путем экстраполяции были рассчитаны T_n и найдены t_n для некоторых оптических стекол, вязкости которых в интервале $10^9 - 10^{14}$ пз. Измерены М. П. Алексеенко [1] и Л. В. Исаевой [12].

Значения t_n для ряда стекол приведены в гл. IV. Температурный интервал $t_n - t_0$ различен у оптических стекол разного состава: он варьирует от 60 до 160° С. Протяженность этого интервала зависит от скорости нарастания вязкости стекла при изменении температуры. По температурному ходу вязкости в области отжига стекла можно делить на «длинные» и «короткие», аналогично тому, как их классифицируют по ходу вязкости в области температур выработки.

Ход вязкости 8 стекол из 13 измеренных М. П. Алексеенко [1] показан на рис. 13. Стекла ЛФ2, Ф1, ТФ7 можно отнести к числу длинных, ТК10, БФ17, ТФ5 — к числу коротких. В основном, чем больше в стекле молекулярное содержание кремнезема, тем оно длиннее. К числу наиболее коротких стекол относятся фосфатные кроны ФК, сверхтяжелые кроны СТК и особые флинт ОФ.

От того, насколько длинным или коротким является стекло, зависит величина интервала между его температурой отжига и температурой спекания, т. е. той температурой, при которой начинается спекание двух соприкасающихся пластинок стекла. Эта температура при принятой методике ее определения отвечает вязкости приблизительно 10^{10} пз. Интервал между температурами спекания и отжига составляет у длинных стекол 100—120, а у коротких — 40—60° С. Этот интервал характеризует стекло с точки зрения возможности его деформации или слипания отдельных кусков при нагревании выше температуры отжига.

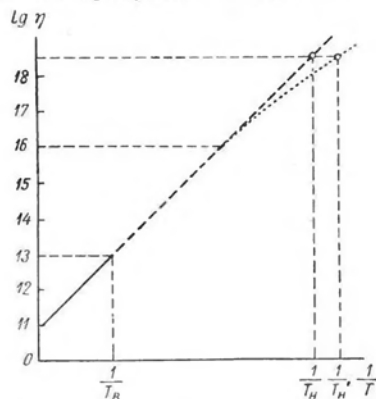


Рис. 12. Температурная зависимость логарифма вязкости стекла: — — — измеренная; — — — экстраполированная; ... — истинная

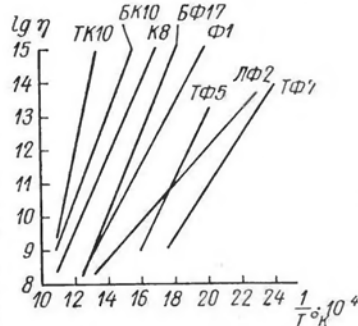


Рис. 13. Температурная зависимость логарифма вязкости некоторых стекол

¹ T — абсолютная температура в °К.

ГЛАВА II

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ
ОТОЖЖЕННЫХ ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

12. Типы и размеры заготовок оптического стекла

Оптическое стекло поставляется выпускающими его заводами в виде заготовок. Современная оптическая промышленность выпускает несколько тысяч разновидностей заготовок. Заготовки разных видов (наименований) различаются между собой формой, размерами, маркой стекла и его качеством.

Все многообразие форм заготовок можно свести к следующим основным типам: плоскопараллельные диски, линзы с одной или двумя выпуклыми или вогнутыми поверхностями, прямоугольные пластинки, призмы прямоугольные и призмы различных других форм.

По своим размерам заготовки делятся на две основные группы: к первой относятся заготовки, не превышающие по диаметру или стороне 150 мм, а ко второй — превышающие 150 мм. С точки зрения технологии отжига первую группу целесообразно разделить на две подгруппы: первую — диаметром или диагональю не более 60 мм, и вторую — более 60 мм. Заготовки размером до 60 мм обычно считают мелкими, от 60 до 150 мм — средними, более 150 мм — крупными.

Качество заготовок оптического стекла нормируется ГОСТом 3514—67. В ГОСТе дана система допусков по всем качественным показателям стекла, зависящим от технологии его производства. В том числе даны допуски на качественные показатели, зависящие от процесса отжига: оптические постоянные (в основном, показатель преломления), однородность партии заготовок по показателю преломления, оптическую однородность и двойное лучепреломление.

Для стекла каждой марки ГОСТом установлены определенные, номинальные оптические постоянные: показатель преломления и средняя дисперсия. Однако эти свойства у реальных стекол по различным технологическим причинам могут отклоняться от их номинальных значений. На эти отклонения ГОСТ дает таблицу допусков, соответствующих пяти категориям качества: от нулевой до четвертой. Нулевой категории отвечают минимально допустимые отклонения показателя преломления и средней дисперсии, соответственно $\pm 3 \cdot 10^{-4}$ и $\pm 3 \cdot 10^{-5}$, а четвертой — максимальные $\pm 20 \cdot 10^{-4}$ и $\pm 20 \cdot 10^{-5}$.

Допуски на отклонение оптических постоянных вытекают из допусков на отступление параметров оптических деталей системы, в которую они входят, от расчетных данных. Например, линза из стекла с показателем преломления $n = 1,50$ должна иметь фокусное расстояние $F = 1000 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$. Тогда допуск на отклонение показателя преломления от номинального значения

$$\Delta n = \pm \frac{\Delta F}{F} (n - 1) = \pm \frac{1}{\frac{1000}{1,5 - 1}} = \pm 0,0005.$$

Следовательно, заготовка этой линзы должна отвечать 1-й категории по показателю преломления. Если относительное отступление фокусного расстояния детали от расчетного нормируется менее строго или если деталь ограничена плоскими поверхностями, то могут быть допущены большие отклонения показателя преломления заготовок, например в пределах допусков по 2—4-й категориям.

Показатель преломления стекла очень сильно зависит от скорости его охлаждения (п. 7). При быстром охлаждении, применяемом после формования стекла, его показатель преломления понижается в среднем на 20—30 единиц 4-го десятичного знака. В процессе тонкого отжига показатель преломления снова повышается и конечное его значение зависит от режима этого отжига. Отклонение конечного значения от номинала должно удовлетворять допуску для категории, указанной в технических условиях на данную заготовку.

Заготовки оптического стекла для приборов, выпускаемых сериями, поставляются партиями. Обычно партия

составляется из стекла одной варки. К оптическим постоянным партии заготовок, идущих на прецизионные приборы, часто предъявляется дополнительное условие: однородность по показателю преломления и средней дисперсии.

Под однородностью партии по показателю преломления и дисперсии понимается одинаковость их значений у всех заготовок партии. Эта однородность позволяет производить блочную обработку заготовок, применяя для всей партии инструмент одного и того же радиуса. Если партия заготовок не однородна по показателю преломления, то в зависимости от его значения при механической обработке приходится для отдельных групп заготовок вводить поправки на радиусы кривизны поверхностей.

Однородность партии заготовок по показателю преломления оценивается по наибольшей его разности в заготовках, составляющих партию. ГОСТом установлены два класса А и Б по однородности партии заготовок по показателю преломления. Более строгим является класс А, устанавливающий максимально допустимую разность показателя преломления в партии $0,5 \cdot 10^{-4}$. Класс Б допускает $1 \cdot 10^{-4}$.

Наиболее сильно подвержены возникновению неоднородности партии заготовок по показателю преломления стекла с большим коэффициентом m (см. стр. 33): многоборные, фосфатные, титано-содержащие, например ФК14, ТК14, СТК9, ОФ4, ЛФ8, Ф9, ТФ11, и некоторые другие.

Проверка однородности партии заготовок по показателю преломления производится дифференциальным интерференционным методом (метод Захарьевского), точность которого равна нескольким единицам шестого десятичного знака. Он регламентируется ГОСТом 8201—56.

14. Нормирование оптической однородности

Как уже ранее отмечалось, оптическая однородность является главной отличительной чертой и основным показателем качества оптического стекла. Однако, когда говорят об оптической однородности заготовки, под этим понимают не полное отсутствие в стекле разности показателя преломления, т. е. отсутствие в нем каких бы то ни было неоднородностей, а имеют в виду практически необходимую однородность, т. е. такую ее степень, которая обеспе-

чивает прибору требуемое оптическое качество. Эта степень однородности определяется допустимым отступлением от полной однородности.

ГОСТ 3514—67 устанавливает две системы оценки оптической однородности. Одна из них предназначена для заготовок мелкого и среднего размеров (диаметр или сторона не более 150 мм), а другая — для заготовок крупного размера (диаметр или сторона больше 150 мм). Установление двух систем оценки однородности связано с применением двух различных методов контроля заготовок диаметром до 150 и более 150 мм.

Качество заготовок мелкого и среднего размеров по оптической однородности оценивается согласно ГОСТу 3518—56 по относительному ухудшению разрешения штриховой миры коллиматорным прибором при введении в него испытываемой заготовки. Относительное ухудшение разрешения характеризуется числовым отношением угла разрешения φ коллиматорного прибора с введенной в его параллельный пучок лучей заготовкой к теоретическому углу разрешения φ_0 , соответствующему диаметру D рабочей зоны заготовки. Углы обычно выражают в секундах, а диаметр — в миллиметрах. Значение теоретического угла разрешения находят из формулы $\varphi_0'' = \frac{120''}{D}$. В прямоугольных пластинках за D принимается диаметр вписанной окружности.

Эта система оценки содержит пять категорий. Первая и вторая категории характеризуются отношением $\frac{\varphi}{\varphi_0} = 1$. Это означает, что качество изображения миры и угол разрешения, обеспечиваемые прибором, не должны ухудшаться от введения в него заготовки. Для первой категории есть дополнительное условие — хорошее качество дифракционного изображения точечной миры.

Остальные категории характеризуются последовательно увеличивающимся значением отношения φ/φ_0 . Для пятой категории оно равно 1,5.

Ограничение применения этой системы оценки диаметром заготовки 150 мм вызвано следующими причинами. Диаметр крупных заготовок часто составляет 500—700 мм, а иногда достигает одного метра и более. Так как контроль оптической однородности заготовки по участкам не достигает цели, то для полноценного контроля крупных

заготовок понадобились бы коллиматорные приборы с диаметром объектива около 1 м. Однако изготовление подобного высококачественного прибора, в частности отбор стекла для объектива и его обработка, является чрезвычайно трудной задачей. Не менее технически трудной и трудоемкой задачей оказалась бы обработка заготовок для их контроля по разрешающей силе. Поэтому для оценки однородности заготовок крупных размеров применяется система, основанная на нормировании краевых напряжений, а следовательно, и физической неоднородности 2-го рода. Чем меньше по величине и чем равномернее с разных сторон на краю заготовки разность хода двух поляризованных лучей, равная произведению двойного лучепреломления на ее толщину, тем эта заготовка однороднее. ГОСТ 3514—67 устанавливает 5 категорий однородности, различающихся допустимым значением краевой разности хода. Отношение допусков для соседних категорий равно 1,7—2. Эти категории в отличие от категорий первой системы обозначены индексом «к». Для каждой категории установлено три допуска для стекол трех групп, различающихся своим коэффициентом Брюстера B : 1) $B \leq 2$ брюстера; 2) $2 < B \leq 2,8$ брюстера; 3) $B > 2,8$ брюстера.

Так как нормируется разность хода поляризованных лучей, то чем толще заготовка, тем меньше должно быть в ней краевое двойное лучепреломление.

Преимуществами второй системы оценки оптической однородности являются несложность аппаратуры и простота обработки заготовок. Для измерения разности хода применяется поляриметр с компенсатором Сенармона, приспособленный к габаритам крупных заготовок. Поверхности их могут быть либо полированными на сукне без всяких требований к точности, либо достаточно тонко отшлифованы. В последнем случае, чтобы сделать их прозрачными при измерении, применяется иммерсионная жидкость.

Вторая система оценки учитывает только неоднородность 2-го рода, в то время как первая система оценивает суммарное влияние всех видов неоднородности. Однако этого, как увидим, вполне достаточно. Химическая неоднородность — свили — контролируется и отбраковывается до отжига на свильных установках. Физическая же неоднородность 1-го рода (структурная) соответствующим

подбором режима отжига может быть сделана значительно меньшей, чем неоднородность 2-го рода. К тому же эти два рода неоднородности имеют противоположные знаки и суммарный эффект их действия меньше, чем от каждой в отдельности. Наконец, равномерность распределения неоднородности 2-го рода относительно оси заготовки свидетельствует о том, что и неоднородность 1-го рода также распределена равномерно. Обеспечиваемое этой системой качество однородности заготовок вполне удовлетворяет требованиям оптико-механической промышленности.

Между одноименными категориями обеих систем статистически установлено соответствие.

Требования по оптической однородности, предъявляемые к заготовке, зависят от требований к разрешающей силе прибора, в котором должна работать деталь, изготавливаемая из заготовки. Например, теоретическая разрешающая сила бинокля Б6 равна $10''^1$, а теоретический угол разрешения объективной линзы $\varphi_0 = \frac{120''}{D} = \frac{120''}{30} = 4''$, т. е. в 2,5 раза меньше угла разрешения

самого бинокля. Даже с учетом влияния на качество изображения бинокля других его деталей здесь можно было бы удовлетвориться 5-й категорией.

У бинокля марки БЯ, разрешающая сила должна быть не ниже 3'', а теоретический угол разрешения заготовки объективной линзы $\varphi_0 = 2,5''$. Поэтому стекло нужно брать не ниже 4-й, а, с учетом искажений, вносимых другими деталями, даже 3 или 2-й категории.

Требования к однородности заготовок линз фотообъективов зависят от светосилы последних². Для светосильных объективов ($D/F = 1:1 - 1:1,5$) разрешающая сила $\varphi = 1000 - 300$ линий/мм. Однако вследствие больших aberrаций, называемых значительной кривизной поверхностей и толщиной линз, разрешающая сила подобных объективов практически не превышает 50—30 линий/мм.

¹ Теоретическая разрешающая сила телескопической системы $\varphi = 60''$: g , где $60''$ — разрешающая сила глаза, а g — увеличение системы; в данном случае $g = 6$.

² Теоретическая разрешающая сила фотообъектива выражается формулой $\varphi = 1400 \frac{D}{F}$ линий/мм.

Поэтому для таких объективов с успехом могут применяться заготовки из стекла 5-й категории однородности.

С понижением светосилы фотообъективов их фактическая разрешающая сила приближается к теоретической, но соотношение между ними все же остается не менее 2. Поэтому и для них могут применяться заготовки невысоких категорий по однородности.

Для коллиматоров, астрообъективов, теневых и интерференционных приборов, оборачивающих систем и светоделительных пластинок, работающих в параллельных пучках, и других систем, в которых должна быть обеспечена теоретическая разрешающая сила, заготовки должны удовлетворять 1-й категории оптической однородности.

Все сказанное здесь в одинаковой мере относится как к заготовкам, не превышающим по диаметру 150 мм, так и к крупным заготовкам.

15. Нормирование двойного лучепреломления

Двойное лучепреломление в заготовке измеряется в середине по ее наибольшему размеру, например, вдоль диаметра или параллельно боковой стороне. Оно контролируется в заготовках и больших и малых размеров одним методом; для заготовок всех размеров установлена одна таблица допусков на двойное лучепреломление, которая содержит пять категорий. Первая из них характеризуется двойным лучепреломлением 2 нм/см , последняя — 50 нм/см . Отношение между соседними категориями приблизительно равно двум.

Нормирование двойного лучепреломления связано с тем, что напряжения в заготовке, параллельные ее рабочим поверхностям, оказывают влияние на точность их обработки. Обработка сторон ведется последовательно. Допустим, что заготовка имеет большое двойное лучепреломление, а следовательно и большие напряжения. Когда после придания одной поверхности необходимой геометрической формы с требуемой оптической точностью производят обработку второй, в заготовке в связи с удалением некоторого слоя стекла происходит перераспределение напряжений [27]. Она упруго изгибается. Вследствие этого первая поверхность искажается и ее оптическое качество понижается. Чем выше требования к однородности заготовок и чем больше их размеры, тем, как правило, выше требования к двойному лучепреломлению.

ГЛАВА III

УКЛАДКА ЗАГОТОВОК И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ОТЖИГА

16. Реальные условия отжига заготовок

В гл. I были рассмотрены схематические, упрощенные условия охлаждения простых геометрических тел (неограниченной или «тонкой» пластины, неограниченного или «длинного» цилиндра и шара) и механизм возникновения в них остаточных напряжений и неоднородностей. При этом принималось условие изотермичности поверхности (в каждый момент времени температура по всей поверхности охлаждающегося или нагревающегося тела была одинаковой), осуществимое лишь в том случае, если одинаковы: температура во всем пространстве, окружающем тело, и коэффициент теплообмена между телом и средой во всех точках его поверхности.

В практике же мы встречаемся с существенными отступлениями от упрощенной формы тел и от условия изотермичности. Так, заготовки оптического стекла имеют конечные размеры, причем отношение их толщины к диаметру или стороне колеблется в широких пределах от 1 : 15 до 1 : 4; встречаются заготовки в виде призм или параллелепипедов близких к кубу, а также, хоть и весьма редко, заготовки близкие по форме к шару.

В диске или пластине конечных размеров, особенно если толщина мало отличается от поперечника, образуются значительные краевые напряжения.

Обычно заготовка отжигается не изолированно, а в общей массе других заготовок, загруженных в печь отжига. Вполне естественно, что в этом случае в массе стекла возникают перепады температуры. Часто бывает, что и сама печь не является свободной от температурных перепадов, происходящих от недостатков ее конструкции. К тому же

разные участки поверхности отжигаемой заготовки находятся в тепловом контакте с различными материалами: стеклом, металлом, воздухом, теплоизоляционными материалами как твердыми (керамика, асбест), так и сыпучими (песок кизельгур), обладающими разными теплофизическими свойствами. Следовательно, и коэффициент теплообмена с окружающей средой в этих участках заготовок различен.

Вследствие перечисленных причин на поверхности заготовки возникают перепады температуры, а внутри заготовки распределение температуры сильно отличается от того, которое было описано в п. 2 для пластинок неограниченных размеров, цилиндра неограниченной длины и шара, при условии изотермичности их поверхности. Оно несимметрично относительно средней плоскости или оси. Это, в свою очередь, отражается на относительном распределении двойного лучепреломления и показателя преломления в заготовках, которое тоже не является симметричным.

В п. 4 при рассмотрении краевого двойного лучепреломления в круглой заготовке (диске) предполагалось, что перепады температуры распределены в ней симметрично относительно оси. В практических условиях отжига симметричное относительно центра заготовки распределение перепадов температуры бывает лишь в отдельных случаях при применении укладки специального типа. В большинстве же случаев перепады температуры по радиусам заготовки не одинаковы. Поэтому краевые напряжения и неоднородности структурные и фотоупругие распределены несимметрично, численные их значения неодинаковы с разных сторон заготовки.

Заготовки призм, даже если они выполнены в виде параллелепипеда (кратные заготовки), совсем не похожи ни на одно из геометрических тел, рассмотренных в п. 2. Они требуют особого подхода к системе их размещения в печи. Система размещения в печи заготовок оптического стекла называется их укладкой.

17. Влияние способа укладки заготовок на перепад температуры в них, напряжения и оптическую однородность

Все способы укладки заготовок можно свести к трем основным типам: изолированному, многослойному и многорядовому.

Изолированная укладка. Этот тип укладки характеризуется тем, что каждая заготовка укладывается в отдельное укладочное приспособление — кольцо или коробку, а его теплофизические свойства и местоположение в печи обеспечивают хороший теплообмен всех точек поверхности заготовки со стенками печи. Благодаря этому в процессе охлаждения заготовки на всей ее поверхности осуществляется условие изотермичности или состояние близкое к нему.

В этом случае перепад температуры по полутолщине и радиусу заготовки отвечает формуле (1). Остаточные напряжения по толщине соответствуют формуле (4а"), а краевые — (8') или, если по радиусу поверхностей заготовки есть какой-то перепад температуры, формуле (10а). Краевые напряжения распределены симметрично оси заготовки.

Оптические неоднородности первого и второго рода в этом случае распределены симметрично. Поэтому они не очень сильно сказываются на качестве изображения мира или точки, получаемого в коллиматорном приборе при контроле заготовки или в приборе, в котором работает изготовленная из нее оптическая деталь. Симметричные неоднородности придают заготовке так называемую «фокусность», она действует, как слабая линза с фокусным расстоянием в несколько сотен или тысяч метров. Для ряда назначений такая заготовка является вполне приемлемой.

Изолированная укладка в основном рекомендуется для заготовок крупного размера и для некоторых видов ответственных заготовок среднего размера.

Многослойная укладка. Многослойной называется такая укладка, при которой заготовки помещаются в укладочное приспособление, например в коробку, стопкой.

Допустим для упрощения задачи, что заготовки представляют собой диски одинаковых размеров с хорошо отполированными плоскими поверхностями, обеспечивающими хороший тепловой контакт между ними. Тогда всю стопку в отношении теплопередачи можно рассматривать как сплошной стеклянный цилиндр.

Будем считать, что на внешней поверхности стопки сохраняются изотермические условия.

Пусть стопка состоит из N дисков толщиной $2b$. Рассмотрим два случая: первый, когда толщина стопки $2Nb$

значительно меньше, чем диаметр дисков, и второй, когда толщина и диаметр стопки близки.

В первом случае стопку можно рассматривать, как пластину с полутолщиной Nb . К ней можно применить формулу (1), подставив Nb вместо b . Тогда перепад температуры в зависимости от координаты x выразится формулой

$$\Delta t_x = \pm \frac{h}{2a} (N^2 b^2 - x^2). \quad (23)$$

Наибольшее значение его в середине стопки будет равно

$$\Delta t_0 = \pm \frac{h}{2a} N^2 b^2. \quad (23a)$$

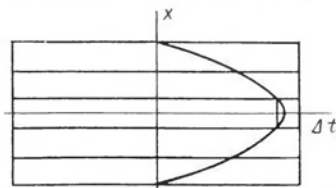


Рис. 14. Распределение перепада температуры Δt в стопке заготовок

Легко заметить, что перепад температуры между серединой и поверхностью в стопке из N заготовок в N^2 раз больше, чем в изолированном диске:

$$\frac{\Delta t'_0}{\Delta t_0} = N^2. \quad (24)$$

Так как по условию поверхность стопки изотермична, то приблизительно такой же перепад температуры будет и по радиусу среднего диска. В остальных дисках перепад будет меньше: он будет убывать по квадратичному закону от среднего (или от средних, если N — четное число) к крайним дискам. На рис. 14 показано распределение перепадов температуры в стопке из пяти дисков.

Во втором случае, когда высота стопки приблизительно равна диаметру диска ($Nb = R$), для определения перепада температуры можно воспользоваться формулой (4a) для шара¹

$$\Delta t'_0 = \pm \frac{hR^2}{6a};$$

тогда перепад температуры в стопке будет больше, чем в отдельном диске

$$\frac{\Delta t'_0}{\Delta t_0} = \frac{1}{3} \left(\frac{R}{b} \right)^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{2b} \right)^2. \quad (25)$$

¹ По характеру распределения температуры шар, короткий цилиндр и куб мало различаются между собой.

Так как диски между собой механически не соединены, то возникающие в каждом из них напряжения представляют собой замкнутую систему сил и должны быть взаимно уравновешены. Поэтому под действием напряжений, вызванных несимметричным перепадом температуры, каждый диск несколько изгибается так, чтобы растягивающие и сжимающие напряжения оказались в статическом равновесии.

Это возможно лишь тогда, когда их распределение по толщине такое же, как и в изолированно-отожженном диске, т. е. когда напряжения на поверхностях вдвое больше напряжений в середине и противоположны им по знаку. Остаточные напряжения на поверхностях будут сжимающими, а в середине — растягивающими. Так как распределение остаточных напряжений в дисках при их многослойной укладке подчиняется параболическому уравнению с такими же параметрами, как в изолированном диске, то и по абсолютной величине напряжения в любых точках каждого диска из стопки равны напряжениям в соответствующих точках изолированного диска. Что же касается краевых остаточных напряжений и временных напряжений при нагревании или охлаждении дисков, уложенных стопкой, то они будут во много раз больше, чем в отдельно отожженном диске. Чем больше перепад температуры по радиусу, тем больше будет второй член во всех формулах (10). Соответственно больше будет, согласно (21), и фотоупругая неоднородность. Так, если $N = 3$, то Δt_x будет в 9 раз больше, а δn_x — приблизительно в 4 раза больше, чем в изолированном диске. Приблизительно во столько же раз будет больше и неоднородность 2-го рода. Должна быть больше и неоднородность 1-го рода, так как, чем больше перепад температуры, тем в большем интервале температур он нарастает пока не станет стабильным. Следовательно, уже при относительно невысоких температурах внутренние участки стекла в стопке будут иметь меньшую скорость охлаждения, чем внешние. Это, в свою очередь, приведет к возникновению разности показателей преломления внутренних и внешних участков, т. е. к структурной неоднородности.

Пусть не все диски будут иметь одинаково большие краевые напряжения и неоднородности. Но, если даже часть из них не будет удовлетворять техническим

условиям, то, как правило, приходится повторно отжигать всю партию.

Для того чтобы все заготовки, включая и находящиеся в середине стопки, не уступали по однородности диску при изолированном типе укладки, скорость их охлаждения должна быть значительно (в несколько раз) меньше скорости охлаждения этого диска.

Рассматривая распределение перепадов температуры в стопке заготовок, мы задались условием, что между ними существует хороший тепловой контакт. В реальных

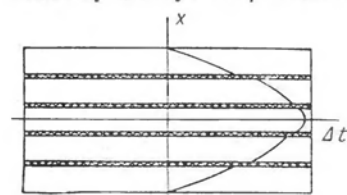


Рис. 15. Перепад температуры Δt в стопке заготовок при плохом тепловом контакте между ними

же условиях поверхности заготовок обычно бывают загрязнены шамотом, глиноземом, или другими материалами, применяемыми в качестве подсыпки при прессовании. Помимо этого, поверхности плоскопараллельных заготовок (не говоря уже о заготовках, ограниченных сферическими поверхностями) на самом деле далеки от плоскости. Поэтому заготовки, уложенные в стопку, соприкасаются между собой лишь в отдельных точках, а остальные участки разделены воздушным промежутком (рис. 15) или песчаной прослойкой. В таких условиях контактный слой оказывает значительное сопротивление теплопередаче, приводящее к образованию скачков температуры на границах между соприкасающимися поверхностями заготовок.

Увеличение краевых напряжений при многослойной укладке видно из следующих данных, являющихся результатом опытов, проведенных автором в производственных условиях.

Заготовки из стекла марки КФ4 диаметром около 110 мм, толщиной 10 мм укладывались в стопки, содержавшие от двух до пяти заготовок, и для сравнения укладывалось несколько таких же одиночных заготовок. Чтобы уменьшить влияние соседних заготовок на теплоотдачу боковой поверхности стопок, между последними оставались воздушные промежутки. Отжиг производился по 2-му режиму (скорость ответственного охлаждения $2,5^\circ \text{C/ч}$). Всего было проведено три отжига. Опре-

делено краевое двойное лучепреломление около 40 заготовок. Расхождения между значениями двойного лучепреломления в заготовках были довольно велики и у некоторых из них достигали 50% его максимального значения.

Средние значения краевого двойного лучепреломления δn_{KN} у заготовок из стопок с одинаковым числом слоев, а также отношения этих средних значений к среднему краевому двойному лучепреломлению δn_{K1} заготовок, уложенных в один слой, приведены в табл. 6.

Таблица 6

| Число заготовок в стопке | Напряжение краевое δn_K в нм/см | | | | $\frac{\delta n_{KN}^1}{\delta n_{K1}}$ |
|--------------------------|---|-----|-----|---------|---|
| | в отжигах | | | среднее | |
| | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | —8 | — | —10 | —9 | — |
| 2 | —13 | — | —15 | —14 | 1,6 |
| 3 | —17 | —16 | — | —17 | 1,9 |
| 4 | —19 | — | — | —19 | 2,1 |
| 5 | — | —28 | — | —28 | 3,1 |

¹ δn_{KN} — краевое двойное лучепреломление при многослойной (двухслойной, трехслойной и т. д.) укладке; δn_{K1} — то же при однослойной укладке.

¹ δn_{KN} — краевое двойное лучепреломление при многослойной (двухслойной, трехслойной и т. д.) укладке; δn_{K1} — то же при однослойной укладке.

Из приведенных данных видно, что краевое двойное лучепреломление возрастает с увеличением числа заготовок в стопке, хотя найденные отношения $\frac{\delta n_{KN}}{\delta n_{K1}}$ меньше N^2 . Это, по-видимому, является следствием недостаточной изотермичности поверхности стопок.

Примерно такие же, как в описанном опыте, отношения краевых напряжений при двухслойной и однослойной укладке дисков были получены в заготовках из стекла типа Ф8 диаметром 80 мм, толщиной 17 мм и диаметром 150 мм, толщиной 27 мм.

Многорядовая укладка. Многорядовой мы называем такую укладку, при которой заготовки размещаются по площади коробки или другого укладочного приспособления в несколько рядов, более или менее плотно сдвинутых между собой.

Многорядовая укладка может сочетаться с многослойной. Именно такой комбинированный тип укладки применяется в большинстве случаев в производстве.

Вначале выясним характер распределения перепадов температуры и влияние его на качество заготовок по однородности и двойному лучепреломлению при однослойной многорядовой укладке. Для упрощения допустим, что заготовки плотно сдвинуты и занимают всю площадь круглой коробки вплоть до стенки и что все промежутки между ними заполнены материалом с температуропроводностью, близкой к температуропроводности стекла. Тогда все содержимое коробки в тепловом отношении можно рассматривать как сплошной стеклянный диск. Допустим также, что поверхности слоя стекла в коробке изотермичны. Тогда к нему можно применить формулу (1) распределения перепада температуры в пластине и формулу (2) распределения перепада температуры в цилиндре.

На основе этих двух формул М. С. Гомельским и В. Н. Зиминым выведена формула для перепада температуры в плоском диске при его равномерном охлаждении.

$$\Delta t_{x,r} = \Delta t_0 \left(1 - \frac{x^2}{b^2}\right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (26)$$

где $\Delta t_{x,r}$ — перепад температуры по радиусу диска в точке с координатами x, r ;

Δt_0 — максимальный перепад температуры по оси диска при скорости охлаждения, вычисляемой по формуле (1a);

b и R — полутолщина диска и радиус его;

x — переменная координата по толщине диска;

r — переменная координата по его радиусу.

Давая конкретные значения x/b или r/R , с помощью этой формулы можно рассчитать и построить кривые перепада температуры по толщине и по радиусу диска. Из формулы (26) следует, что зависимость Δt от x и от r имеет параболический характер. На рис. 16 представлен слой стекла с параболическим распределением перепада температуры по радиусу в его средней плоскости. При параболическом распределении перепада температуры основная его часть — $0,75\Delta t_0$ — падает на краевую зону, равную по ширине 0,5 радиуса коробки; на зону же шириной 0,3 радиуса приходится половина всего перепада Δt_0 . По диаметру каждой из заготовок также будет перепад

температуры, равный части общего перепада, соответствующей ее местоположению. В заготовке, расположенной в центре коробки, радиальный перепад температуры симметричен относительно ее оси.

В заготовках же, находящихся не в середине коробки, он всегда несимметричен, причем отступление от симметрии тем больше, чем дальше от центра коробки находится заготовка. Особенно сильно отступает от симметрии распределение радиального перепада температуры в заготовках, расположенных в краевой зоне. Как было показано в пп. 4 и 9, перепад температуры по диаметру или по радиусу заготовки приводит к возникновению краевых напряжений и образованию структурных и фотоупругих неоднородностей.

Если радиальный перепад температуры несимметричен относительно центра заготовки, то и вызываемые им краевые напряжения неоднородности также будут несимметричными и неравномерными. Особенно неравномерными и несимметричными краевыми напряжениями и неоднородностями обладают заготовки, расположенные в краевой зоне. В лучшем случае эта несимметричность может вызвать образование оптического клина: плоскопараллельная пластинка, сделанная из такой заготовки, будет отклонять проходящий через нее пучок лучей от направления его падения, как клиновидная. В худшем случае оптическая деталь, сделанная из заготовки, будет в проходящем световом пучке вызывать различные виды аберраций, например, астигматизм, кому¹ и т. п.

Если отвод тепла металлом коробок к стенкам печи недостаточно интенсивен, то по их радиусу, а следовательно, и по поверхности массы стекла возникнет перепад температуры. Этот перепад складывается с перепадом температуры, обусловленным толщиной заготовок, в результате чего общий перепад температуры будет больше, чем в случае изотермической поверхности стекла. Соответственно большими будут и вызываемые им неоднородности.

¹ Астигматизм — фокусирование светового пучка от светящейся точки в виде двух взаимно-перпендикулярных линий, расположенных в двух точках оптической оси. Кома — отклонение части светового пучка в сторону от основного, приводящее к тому, что изображение малой светящейся точки становится похожим на комету, оно имеет ядро и размытый хвост.

В том случае, когда многорядовый тип укладки применен к мелким заготовкам, имеющим малые диаметр и толщину, невелики неоднородности, возникающие даже в тех из них, которые расположены в краевой зоне у самой стенки коробки. Эти неоднородности могут оказаться в пределах допусков, установленных даже для высоких категорий однородности.

В случае же, когда многорядовый тип укладки применен к заготовкам среднего и особенно крупного размеров, неоднородности в тех из них, которые расположены в краевой зоне, могут оказаться настолько значительными, что не будут удовлетворять допускам для высоких категорий оптической однородности. Они смогут удовлетворить лишь требованиям низких категорий однородности.

Сочетание многослойной и многорядовой укладок. При сочетании многорядовой укладки с многослойной перепад температуры сохраняет такой же параболический характер распределения, как и в случае простой многорядовой укладки при одинаковой скорости охлаждения, но он значительно больше по величине.

Примем, как и прежде, ряд условий:

- 1) коробка плотно заполнена заготовками по площади и по высоте;
- 2) промежутки между заготовками заполнены материалом с такой же, как у стекла, теплопроводностью;
- 3) поверхность массы стекла изотермична.

Пусть по высоте коробки l уместается N слоев. Тогда полутолщина слоя стекла в коробке $\frac{l}{2} = Nb$, где b — полутолщина заготовки. Перепад температуры в коробке будет равен $\Delta t_N = \frac{hN^2b^2}{2a}$, т. е. в N^2 раз больше, чем при однослойной укладке. Такой же примерно перепад температуры наблюдается и по радиусу среднего слоя заготовок. Соответственно и неоднородность в заготовках краевой зоны среднего слоя значительно больше, чем при однослойной многорядовой укладке. Хотя в остальных слоях краевой, радиальный перепад температуры, а следовательно, и неоднородность будут меньше, чем в среднем, оценка качества отжига партии заготовок проводится по худшим ее представителям.

Чтобы получить удовлетворительное качество отжига всей партии заготовок при их многослойно-многорядовой укладке, нужно уменьшить скорость ответственного охлаждения, а следовательно, удлинить цикл отжига.

Рассматривая характер распределения перепада температуры в массе заготовок, уложенных в одну коробку, во всех описанных выше типах укладки мы исходили из условия, что в тепловом отношении заготовки представляют собой сплошной монолитный стеклянный диск. Однако в действительности это не так. Реальные заготовки — это не плоско-параллельные диски с полированными поверхностями. Часто эти поверхности являются сферическими. В лучшем случае они имеют «огневую полировку», в худшем — они бывают шероховатыми, загрязненными крупинками шамота или другого материала. Это приводит к понижению коэффициента теплоотдачи поверхности заготовки и ухудшает теплообмен между ними.

Промежутки между стопками или между отдельными заготовками обычно бывают заполнены воздухом, а в иных случаях песком или другим теплоизоляционным материалом, отличающимся по теплопроводности от стекла. Поэтому распределение температуры по радиусу массы заготовок в коробке не имеет того плавного вида, как на рис. 16, а носит неправильный ступенчатый характер, отчего перепад температуры в коробке становится больше. Однако при этом в каждой заготовке сохраняются основные черты описанного нами параболического распределения температуры.

Зависимость характера распределения краевых напряжений в заготовке от ее местоположения в коробке подтверждается результатами определения напряжений в заготовках из рядовых производственных отжигов. Как правило, заготовки, уложенные в центр тарелки, имеют симметричное распределение краевых напряжений, в то время как заготовки, лежащие на краю коробки,

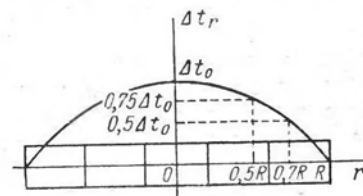


Рис. 16. Распределение перепада Δt температуры в слое стекла (диске) по радиусу

обладают весьма неравномерным их распределением. При этом степень неравномерности может достигать 50—60% и более.

Из изложенного следует, что тип укладки стекла и режим отжига должны выбираться в соответствии с размерами заготовок и техническими условиями на их качество.

Общий вывод из сказанного выше о влиянии разных типов укладки заготовок простой формы (плоскопараллельных дисков) на их качество таков: основной причиной повышения краевых напряжений и понижения однородности заготовок являются большие перепады температуры, вызванные влиянием края (особенно при большой толщине заготовки или массы заготовок в коробке) и недостаточностью теплопередачи между средними зонами стекла, загруженного в печь отжига, и ее стенками. Для получения заготовок высокого качества по однородности и двойному лучепреломлению, не прибегая к удлинению цикла отжига, необходимо применять такие способы и приемы укладки, которые способствовали бы возможно большему приближению условий отжига партии заготовок к условиям отжига единичной заготовки с изотермической поверхностью. Эта задача может быть осуществлена путем: 1) применения толстых металлических прокладок; 2) устройства тепловой защиты боковой поверхности заготовки или группы заготовок; 3) оставления воздушных зазоров между отдельными укладочными приспособлениями.

18. Толстые металлические прокладки

Перепады температуры, неизбежно возникающие в рабочем пространстве печи и в загруженных в печь заготовках во время ее нагревания и охлаждения вследствие несовершенной теплопроводности материалов, можно считать закономерными. Помимо того в печи могут быть местные перепады температуры, являющиеся следствием несовершенства конструкции печи. Такие перепады могут появляться в разных направлениях (по высоте, диаметру, по диагонали печи), возникать в течение всех этапов цикла отжига, изменяясь по величине и даже по знаку, и, накладываясь на перепады, вызванные охлаждением, оказывать влияние на качество заготовок.

Основным средством ослабления перепадов температуры по радиусу отдельной крупной заготовки или укладочного приспособления, содержащего группу мелких заготовок, являются толстые металлические прокладки. Этими прокладками могут быть горизонтальные стенки укладочных приспособлений (донья коробок, диски) или массивные полки, на которых размещаются укладочные приспособления.

Приводим способ расчета минимально необходимой толщины металлической прокладки (горизонтальной стенки укладочного приспособления), обеспечивающей получение требуемого качества отжига заготовок, разработанный В. Н. Зиминым¹.

Рассмотрим случай охлаждения стеклянных дисков, имеющих радиус R и полутолщину b_c (рис. 17). Пусть между стеклянными дисками проложены металлические диски того же радиуса с полутолщиной b_m и пусть теплоотдача стеклянных дисков через боковую (цилиндрическую) поверхность отсутствует (допустим, что она защищена теплоизоляцией). Следовательно, вся теплоотдача стекла происходит лишь через плоские поверхности в металл. Металлические же диски, напротив, не могут отдавать тепло через плоские поверхности, которые защищены стеклом, и все тепло, как свое, так и полученное от стекла, отдают через боковую поверхность. Назовем сочетание металлического диска и прилегающих к нему половин верхнего и нижнего стеклянных дисков комплектом.

Положим, что в периоде «регулярного режима», скорость охлаждения всего комплекта равна $h_k^{\circ}\text{C/r}$. Перепад температуры по радиусу металлического диска, соответ-

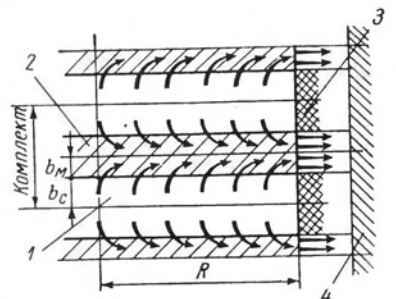


Рис. 17. Схема отвода тепла из стопки металлическими прокладками:

1 — стеклянный диск; 2 — металлический диск; 3 — теплоизоляция; 4 — стенка печи

¹ Этот способ не опубликован и приводится с согласия В. Н. Зимина.

ствующий этой скорости охлаждения, обозначим через Δt_R . Этот перепад температуры является, как говорят, «тепловым напором», под действием которого поток тепла переносится из средних зон диска к его боковой поверхности. Если бы вместо смешанного цилиндра из стеклянных и металлических дисков мы имели сплошной металлический цилиндр радиуса R , то в нем перепад температуры Δt_R мог бы установиться при скорости h_m , которая может быть найдена из формулы (2а). Естественно, $h_m > h_k$.

Отношение полутолщины металлического и стеклянного дисков находится в следующей зависимости от отношения теплофизических свойств обоих материалов и скоростей h_k и h_m :

$$\frac{b_m}{b_c} = \frac{(c\gamma)_c}{(c\gamma)_m} \frac{h_k}{h_m - h_k} \quad (27)$$

или

$$\frac{b_m}{b_c} = \frac{\lambda_c}{\lambda_m} \frac{a_m}{a_c} \frac{h_k}{h_m - h_k}, \quad (27a)$$

где c — теплоемкость;

λ — коэффициент теплопроводности;

a — коэффициент температуропроводности;

γ — плотность.

Как известно, теплофизические величины связаны следующей зависимостью:

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}.$$

Отношение

$$\frac{(c\gamma)_c}{(c\gamma)_m} = \frac{\lambda_c a_m}{\lambda_m a_c}$$

является величиной, мало зависящей от состава стекла. Произведение $(c\gamma)_c$ для 23 различных стекол, рассчитанное по данным Д. Е. Вильнера и О. В. Ильиной [2] для c и γ при 20° С, находится в пределах от 0,39 до 0,46; среднее значение $(\gamma c)_c = 0,425 \pm 0,035$ кал/см³ °С.

Согласно данным более поздних источников [9, 19], теплоемкость при 400—600° С примерно в 1,6 раз больше, чем при 0—100° С. Поэтому $(c\gamma)_c$ в области температур отжига стекла принимается равным в среднем 0,68. Для разных стекол оно может отступать на $\pm 0,06$ от среднего значения.

В качестве материала для металлических дисков обычно используется сталь. Это объясняется ее дешевизной, жаростойкостью, твердостью, а также и тем, что она легко поддается отливке и обработке.

Для стали значение $(c\gamma)_m = 0,82$ кал/см³ °С. Отметим, кстати, что среди ряда других металлов и сплавов сталь имеет одно из наиболее высоких числовых значений $(c\gamma)_m$. Так, например, для меди оно равно 0,83, для бронзы 0,77, серебра 0,58, платины 0,70 и лишь для инвара 0,92 (т. е. больше, чем для стали).

Согласно данным, приведенным В. С. Чиркиным [25], теплоемкость стали в области температур 400—600° С в среднем в 1,3 раза больше, чем в интервале 0—100° С. Следовательно, при температурах отжига стекол $(c\gamma)_m = 1,07$ кал/см³ °С.

В среднем отношение $\frac{(c\gamma)_c}{(c\gamma)_m} = \frac{0,68}{1,07} = 0,64$.

Зависимость между отношением скоростей h_k/h_m и отношением толщин дисков b_m/b_c при различных значениях $\frac{(c\gamma)_c}{(c\gamma)_m}$ изображена гра-

фически на рис. 18. Пользуясь кривыми рис. 18, легко при данных размерах стеклянных и металлических дисков найти соответствующую скорость охлаждения или для заданного режима охлаждения определить необходимую толщину металлических прокладок. Кривые показывают, что b_m/b_c практически можно менять в довольно узких пределах. Так, например, уменьшение

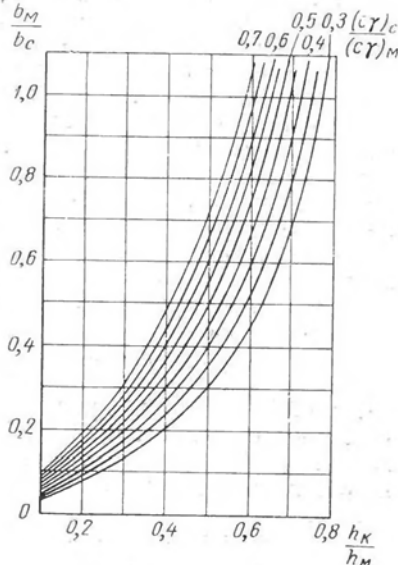


Рис. 18. Зависимость относительной полутолщины металлических прокладок $\frac{b_m}{b_c}$ от относительной скорости охлаждения $\frac{h_k}{h_m}$

этого отношения до значений меньше 0,2 приводит к резкому уменьшению h_k/h_m и, следовательно, к сильному уменьшению скорости охлаждения комплекта h_k . Увеличение же b_m/b_c свыше 0,6—0,7 мало эффективно, так как не дает существенного повышения h_k . Поэтому применение металлических дисков с относительной толщиной b_m/b_c менее 0,2 и более 0,7 нецелесообразно.

При расчете допустимой скорости охлаждения h_k комплекта или необходимой толщины металлических дисков $2b_m$ следует исходить из значения допустимого перепада температуры Δt_R . Этот перепад, являясь внешним для стеклянного диска, вызывает, как указывалось в п. 4, появление дополнительного краевого напряжения согласно формуле (9) и соответствующего двойного лучепреломления согласно (9'). Поскольку для заготовок крупного размера категории по оптической однородности характеризуются величиной краевого двойного лучепреломления, допустимое значение Δt_R может быть найдено из формулы (106) исходя из категории однородности размеров и свойств стеклянного диска.

Скорость охлаждения h_m металлического цилиндра заданного радиуса R , соответствующая перепаду температуры Δt_R , может быть найдена с помощью номограммы, изображенной на рис. 19. На ней по осям координат отложены Δt_R и h_m , а лучи соответствуют различным радиусам, но обозначены они размером по диаметру дисков в комплекте.

Приведем примеры расчета b_m или h_k .

Пример 1. Нужно отжечь заготовку стекла марки К8 диаметром 400 мм и толщиной 60 мм по категории 1к (разность хода лучей $dn \cdot 2b_c = 60$ нм). Следовательно, $R = 200$ мм, $b_c = 30$ мм. Примем, что перепад температуры по радиусу заготовки может быть вызван только перепадом температуры в комплекте, т. е. Δt_R . Тогда для нахождения Δt_R нужно разделить краевое двойное лучепреломление на коэффициент BG (см. табл. 3) для стекла К8 при высокой температуре. Двойное лучепреломление равно разности хода, деленной на толщину заготовки, в сантиметрах. Следовательно,

$$\Delta t_R = \frac{\delta n_k}{37} = \frac{60}{6 \cdot 37} = 0,28^\circ.$$

Используя номограмму рис. 19, находим $h_m = 1,8^\circ \text{C/ч}$. Если мы располагаем металлическими дисками толщиной 20 мм, то $b_m/b_c = 10/30 = 0,33$. Принимая $(\sigma)_c/(\sigma)_m = 0,6$, по номограмме (рис. 18) определяем значение $h_k/h_m = 0,36$, откуда $h_k = 0,36 h_m = 0,65^\circ \text{C/ч}$.

Если толщина металлических дисков меньше, например, 10 мм, то $b_m/b_c = 0,17$ и $h_k/h_m = 0,22$; следовательно, $h_k = 0,4^\circ \text{C/ч}$.

Пример 2. Задано: диаметр заготовки из стекла ТФ5 800 мм, толщина 100 мм. Коэффициент Брюстера стекла ТФ5 $B < 2$. Категория по оптической однородности 1, т. е. краевая разность хода не должна превышать 40 нм (по ГОСТу 3647).

Находим двойное лучепреломление: $\delta n_k = 40 : 10 = 4$ нм/см. Наибольший допустимый перепад температуры по радиусу $\Delta t_R = 4 : 8,5 = 0,47^\circ \text{C}$. По номограмме рис. 19 соответствующая скорость

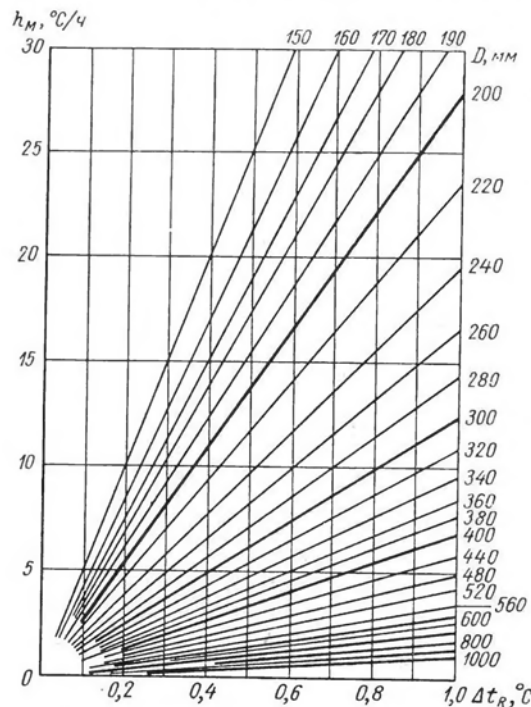


Рис. 19. Зависимость скорости охлаждения металла h_m от допустимого перепада температуры Δt_R и диаметра диска D

охлаждения металла $h_m = 0,8^\circ \text{C/ч}$. Для того чтобы быстрее провести отжиг, применим скорость снижения температуры $0,5^\circ \text{C/ч}$, тогда $h_k/h_m = 0,63$. По номограмме рис. 18 [при $(\sigma)_c/(\sigma)_m = 0,6$] соответствующее значение отношения $b_m/b_c \approx 0,95$, т. е. толщина металлических дисков должна быть равной $2b_m = 100 \cdot 0,95 = 95$ мм. Диски таких размеров вряд ли приемлемы; они требуют специального изготовления, поскольку

в практике применяются лишь диски значительно меньшей толщины. Кроме того, такой диск, наложенный на стекло, создаст на него слишком большое давление.

Поэтому рациональней применить скорость охлаждения $0,2^\circ \text{C/с}$.

В этом случае $h_k/h_m = \frac{0,2}{0,7} \approx 0,3$, а соответствующее значение $b_m/b_c = 0,25$. Следовательно, в этом случае можно применить металлические диски толщиной $2b_m = 100 \cdot 0,25 = 25 \text{ мм}$.

В формуле (27) для упрощения не учтена теплоотдача боковой цилиндрической поверхности стеклянных дисков. В действительности, если по радиусу комплекта есть перепад температуры Δt_R , значит есть небольшой тепловой поток, направленный от центра к ее боковой поверхности стеклянного диска. Это свидетельствует о том, что происходит отдача тепла его боковой поверхностью, несколько увеличивающая и скорость охлаждения h_k и перепад температуры Δt_R . Доля тепла, отдаваемого боковой поверхностью диска, при выбранном соотношении его размеров не превышает 10% всего количества отдаваемого тепла.

При выводе формулы (27) были приняты следующие упрощающие условия.

1. Диаметр металлических дисков был принят равным диаметру стеклянных. Однако, в действительности, для эффективного отвода тепла необходимо, чтобы края металлических прокладок выступали за края стекла. Как увидим далее, в практических условиях так и поступают. Поэтому при расчетах следует учитывать полный диаметр металлического диска.

2. Не учитывалась теплоотдача боковой поверхности стеклянных дисков, которая в той или иной мере существует в реальных условиях.

3. Было принято допущение, что между стеклянными и металлическими дисками существует хороший тепловой контакт, обеспечивающий равномерную по всей поверхности соприкосновения теплопередачу из стекла в металл. Такие условия становятся реальными лишь в том случае, когда поверхности металлического и стеклянного дисков представляют собой правильные плоскости, хорошо обработанные (отполированные или тонко отшлифованные), тщательно очищенные от загрязнений и соприкасающиеся непосредственно без каких-либо прослоек. В этом случае формула применима для расчета толщины прокладок или скорости охлаждения.

Однако на практике заготовки в большинстве случаев не подвергаются такой тщательной обработке, а металлические диски имеют далеко не идеально плоские поверхности, часто покрытые окалиной или ржавчиной. Иногда поверхности стекла и металла оказываются разделенными прослойкой сыпучих материалов или воздуха. Все указанные причины ухудшают теплопередачу из стекла в металл, делают ее неравномерной. Вследствие этого неизбежно ослабляется действие металлического диска, выравнивающее температуру по радиусу стеклянного диска. Для понижения возрастающего при этом перепада температуры до значения, допустимого согласно расчету, необходимо соответственно уменьшить скорость охлаждения комплекта.

Предложить какую-либо формулу для корректирования скорости охлаждения в зависимости от ухудшения условий теплопередачи между стеклом и металлом очень трудно. Здесь следует просто ввести «коэффициент запаса», на который надо умножить значения h_k , чтобы получить требуемое двойное лучепреломление. Указанный коэффициент запаса находят экспериментально или статистическим путем на основе большого практического материала. Так, например, для дисков диаметром 150—300 мм этот коэффициент запаса составляет 0,5—0,25.

19. Воздушные промежутки

В ряде случаев выравнивающее действие металлических дисков может оказаться недостаточным. В основном это может быть обусловлено недостаточной их толщиной, не соответствующей толщине стеклянного диска и выбранной скорости охлаждения. В этом случае реальный перепад температуры в металлических дисках (внешний перепад на поверхности стеклянных дисков) будет больше предельного, получаемого по номограмме рис. 19. Соответственно будут больше краевые напряжения и краевая неоднородность.

Некоторое понижение перепада температуры по радиусу металлических дисков, т. е. улучшение их выравнивающего действия, может быть достигнуто организацией теплоотдачи не только с боковой, но и с плоской поверхности металлического диска. Для этого комплекты разъединяются; каждый стеклянный диск заключается между

пропорционально количествам переносимого тепла, т. е.

$$\frac{\Delta t'_R}{\Delta t_R} = \varphi,$$

где Δt_R — перепад температуры при отсутствии промежутков между комплектами;

$\Delta t'_R$ — перепад температуры при их наличии.

Отсюда

$$\Delta t'_R = \varphi \Delta t_R. \quad (29)$$

Следовательно, и $\delta n'_k = \varphi \delta n_k$.

Пример. Возьмем условия примера 1 из п. 18.

Для того, чтобы на краю диска из стекла К8 диаметром 400 мм и толщиной 60 мм разность хода поляризованных лучей не превышала 60 нм, нужно, чтобы радиальный перепад температуры Δt_R на поверхности не превышал $0,28^\circ$. По расчету для этого при толщине металлических дисков 20 мм нужно вести охлаждение со скоростью $0,65^\circ \text{C/ч}$, а при толщине дисков 10 мм — со скоростью $0,4^\circ \text{C/ч}$.

Применяя формулу (28), найдем, что при оставлении промежутков между комплектами радиальный перепад температуры равен:

$$\text{при дисках толщиной 20 мм } \varphi = \frac{10}{10 + 0,05 \cdot 200} = 0,5;$$

$$\text{при дисках толщиной 10 мм } \varphi = \frac{5}{5 + 0,05 \cdot 200} = 0,33.$$

Применяя воздушные промежутки и сохраняя скорость охлаждения, можно понизить краевую разность хода, а увеличив скорость охлаждения в $\frac{\Delta t'_R}{\Delta t_R} = \frac{1}{\varphi}$ раз, быстрее отжечь стекло, не выходя за пределы допуска по однородности.

Приведа формулу (28) к виду

$$\varphi = \frac{1}{1 + 0,05 \frac{R_m}{b_m}}, \quad (28a)$$

легко заметить, что чем больше отношение R_m/b_m , т. е. чем относительно тоньше металлические диски, тем сильнее сказывается влияние воздушного промежутка между комплектами, выражаемое вторым слагаемым знаменателя.

В заключение остается указать, каков должен быть этот воздушный промежуток, от величины которого зависит доля излучения больших поверхностей в общем потоке

излучений металлических дисков. На основе практического опыта может быть рекомендован промежуток между комплектами примерно равный 0,1 диаметра металлического диска или укладочного приспособления другого типа.

20. Защитное кольцо

Металлические диски и воздушные промежутки между комплектами эффективно уменьшают перепад температуры по поверхности заготовки. Однако этими средствами нельзя устранить или хотя бы ослабить радиальный перепад температуры внутри заготовки, обусловленный ее толщиной и низкой теплопроводностью стекла. Для уменьшения этого температурного перепада необходимо в возможно большей степени ослабить теплоизлучение боковой

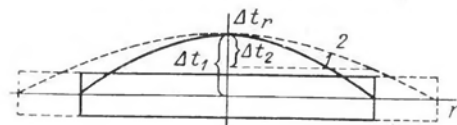


Рис. 21. Перепад температуры по радиусу Δt_r в диске с незащищенной (1) и защищенной (2) поверхностью

поверхности заготовки. Ослабление теплоизлучения боковой поверхности достигается путем создания вокруг заготовки защитного кольца. Пусть заготовка представляет собой диск и пусть поверхность его изотермична. Распределение перепада температуры по его диаметру имеет характер вытянутой параболы, как это представлено на рис. 16. Представим себе, что стеклянный диск плотно вложен в кольцо из стекла того же состава, имеющее ту же толщину, а диаметр в $1\frac{1}{2}$ раза больше, чем этот диск (рис. 21). При этом пусть перепад температуры по радиусу диска с кольцом останется таким же Δt_1 , какой имел диск без кольца, и поверхность их будет также изотермичной. В этом случае, как видно из рис. 21, перепад температуры Δt_2 по радиусу самого диска, защищенного кольцом, значительно меньше, чем перепад Δt_1 в диске без кольца: основная часть перепада температуры $\Delta t_1 - \Delta t_2$ находится в стеклянном кольце. Так как диск и кольцо

не являются одним целым, то краевые напряжения в диске зависят только от перепада Δt_2 и не изменяются после удаления кольца.

Чем больше внешний радиус кольца превышает радиус диска, т. е. чем больше ширина кольца, тем меньше перепад температуры Δt_2 по сравнению с Δt_1 .

Изготовление защитных колец из стекла — дело весьма дорогое и практически неосуществимое, особенно при большом разнообразии марок стекла и размеров заготовок. К тому же, как видим, защитное кольцо из стекла не устраняет полностью перепад температуры. Поэтому защитное кольцо удобнее делать из сыпучих материалов, порошкообразных или гранулированных, которым легко придать любую форму.

Теплофизические свойства этих материалов должны быть иными, чем у стекла, такими, чтобы при возможно меньшей ширине кольца они как можно сильнее уменьшали перепад температуры по радиусу стеклянного диска.

В. Н. Зимин разработал основные зависимости расчета¹ теплофизических свойств и размеров защитного кольца от размеров и соответствующих свойств стеклянного диска. За основные исходные условия для расчета он принял: одинаковое изменение теплосодержания масс диска и защитного кольца, отнесенного к единице поверхности того и другого, и одинаковые скорости охлаждения диска и кольца.

При этом в сечении контактной поверхности, естественно, будут одинаковыми и перепады температуры.

Согласно первому условию

$$h_k b_{np.k} c_k \gamma_k = h_c b_c c_c \gamma_c,$$

а поскольку по второму условию $h_k = h_c$, то

$$\frac{b_{np.k}}{b_c} = \frac{(c\gamma)_c}{(c\gamma)_k} = \frac{\lambda_c a_k}{a_c \lambda_k}, \quad (30)$$

где $b_{np.k}$ — приведенная толщина кольца, равная отношению его объема к свободной поверхности:

$$b_{np.k} = \frac{V}{S},$$

¹ Расчеты из неопубликованной работы В. Н. Зимина; материал приводится с разрешения автора.

h — скорость охлаждения;

a — температуропроводность;

λ — коэффициент теплопроводности;

c — коэффициент теплоемкости;

γ — удельный или объемный вес.

Индекс k относится к теплозащитному кольцу, c — к стеклу.

Поскольку толщина защитного кольца $2b_k$ должна быть равна толщине диска $2b_c$, то приведенная толщина $b_{np.k}$ первого всегда меньше полутолщины второго $b_{np.k} < b_c$, откуда на основании (30)

$$(c\gamma)_c < (c\gamma)_k.$$

Это первое требование к теплофизическим свойствам материала для защитного кольца: объемная теплоемкость стекла должна быть меньше соответствующей теплоемкости материала кольца.

Методом конечных разностей, применяемым в теплотехнике для приближенного решения практических задач, Зимин нашел, что отношение коэффициентов теплопроводности материала кольца и стекла должно быть равно отношению соответствующих объемных теплоемкостей, откуда

$$\lambda_k = \lambda_c \frac{(c\gamma)_k}{(c\gamma)_c}.$$

Это второе требование к свойствам материалов.

Из сопоставления выражения (30) и второго требования вытекает, что

$$a_k = a_c,$$

т. е. что коэффициенты температуропроводности материала кольца и стекла должны быть одинаковы.

Теплофизические свойства стекол некоторых типов, жаростойких металлов и ряда огнеупоров при 500—600° С приведены в табл. 7.

Как видно из табл. 7, увеличение $c\gamma$ большею частью сопровождается увеличением λ и a ; поэтому среди обычно применяемых в технике материалов очень трудно найти такие, которые могли бы быть непосредственно применимы для устройства защитных колец.

Требуемого соотношения теплофизических свойств защитного кольца и стекла можно достичь, если для

Таблица 7

| Материал | Объемная теплоемкость c_v в $\frac{\text{ккал}}{\text{град} \cdot \text{м}^3}$ | Коэффициент теплопровод- ности λ в $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$ | Коэффициент температу- ростепро- водности α в $\text{м}^2/\text{ч} \cdot 10^3$ |
|---------------------------------|---|---|---|
| Стекла: | | | |
| крон (К) | 650 | 1,1 | 1,7 |
| тяжелый крон (ТК) | 640 | 0,9 | 1,4 |
| флинт (Ф) | 590 | 1,02 | 1,75 |
| тяжелый флинт (ТФ) | 620 | 0,66 | 1,1 |
| Чугун | 1080 | 38 | 35 |
| Литая сталь С30 | 1000 | 36 | 36 |
| Сталь легированная X18H9T | 1060 | 19 | 18 |
| Магнезит | 690 | 4,2 | 6,0 |
| Хромомagneзит | 600 | 1,6 | 2,6 |
| Высокоглиноземистый огнеупор | 550 | 1,4 | 2,5 |
| Огнеупоры: | | | |
| шамотный | 450 | 0,9 | 2,0 |
| легковесный | 250 | 0,3 | 1,2 |
| Песок | 280 | 0,28 | 1,0 |
| Кизельгур (диатомит) | 60 | 0,06 | 1,0 |
| Воздух сухой | 0,32 | 0,048 | 15,1 |

изготовления защитного кольца применить смесь разных материалов, обладающих различной удельной теплоемкостью и теплопроводностью, например, металлических частиц (опилок, стружки) и молотого огнеупора. Теплофизические характеристики такой смеси можно максимально приблизить к выведенным выше оптимальным характеристикам материала защитного кольца.

По расчетам Зимина, наиболее хороший результат, т. е. минимальные краевые напряжения, дает теплозащитное кольцо из смеси железных опилок с порошкообразным магнезитом. Экспериментальная проверка подтвер-

дила этот вывод. Она была проведена на четырех стеклянных дисках диаметром 300 и толщиной 40 мм. Три из них отжигались в защитных кольцах одинаковой ширины из разных материалов, а один для сравнения — без защитного кольца. Скорость равномерного охлаждения была равна 5°C/ч . Результаты измерения краевых напряжений, выраженных в нм/см , приведены в табл. 8.

Таблица 8

| Материал защитного кольца | Двойное лучепреломление по краю в нм/см | |
|---|---|---------|
| | Пределы | Среднее |
| Без теплоизоляции | 30—52 | 41 |
| Металл | 30—35 | 33 |
| Легковесный огнеупор | 19—30 | 25 |
| Синтетический огнеупор (смесь железа с магнезитом) | 5—12 | 9 |

Из приведенной таблицы четко видно большое преимущество защитного кольца из синтетического материала. Но и простые, природные материалы, применяемые в производстве, не все равноценны. Так, например, опыты автора данной книги, проведенные на дисках диаметром 250 и толщиной 45 мм из стекла К8 с применением защитного кольца из кизельгура (диатомита) и кварцевого песка, показали, что с кизельгуром краевое двойное лучепреломление в среднем в 2 раза ниже, чем с песком.

В. Н. Зимин вывел следующую зависимость, связывающую ширину защитного кольца с размерами диска и теплофизическими свойствами их материалов:

$$\frac{d}{b} = \frac{1}{\omega} - \frac{R}{b} + \sqrt{\frac{1}{\omega^2} + \left(\frac{R}{b}\right)^2}, \quad (31)$$

где

d — ширина защитного кольца;

b — полутолщина диска и кольца;

R — радиус диска;

ω — величина, равная $\frac{(c\gamma)_\kappa}{(c\gamma)_c} - 1$;

c_κ — теплоемкость материала кольца;

γ_κ — удельный или объемный вес кольца;

c_c и γ_c — аналогичные свойства стекла.

Поскольку $\omega < 1$, то $\frac{1}{\omega} > 1$. Подставляя в формулу (31) различные реально возможные значения ω от 0,2 до 0,6 и R/b от 4 до 15, можно построить номограмму для расчета d/b , изображенную на рис. 22.

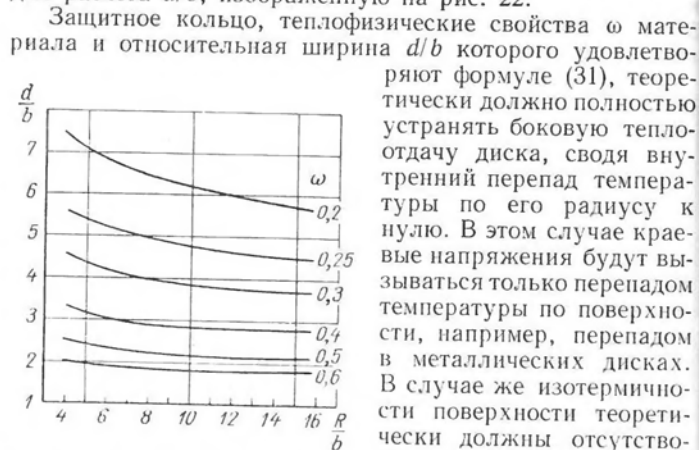


Рис. 22. Номограмма для определения относительной ширины защитного кольца $\frac{d}{b}$

ваны для боковой теплозащиты, для полного устранения краевых напряжений необходимо применить защитное кольцо очень большой ширины. При относительных размерах диска $R/b \approx 10$ ширина кольца « d » должна составлять примерно $4b$, т. е. должна равняться удвоенной толщине диска или $0,4R$.

Если задаваться целью не полного снятия краевых напряжений, а лишь ослабления их до значения, не превышающего допуска по техническим условиям, то d может быть принято более узким, например, равным $2b$. Значит, d/b мало зависит от отношения R/b .

Если распределение температуры по толщине диска не симметрично, что бывает при недостаточном отводе тепла от средних дисков, необходимо увеличивать ширину кольца в 1,5—2 раза. Это вызывается тем, что несимметричное распределение температуры по толщине заготовки как

и многослойная укладка приводит к увеличению ширины ее краевой зоны с большим перепадом температуры. Несимметричное распределение температуры по толщине равносильно увеличению полутолщины b_c диска.

21. Примеры укладки круглых заготовок разных размеров

Применение того или иного типа и способа укладки, как это было отмечено выше, связано с размерами заготовок и требованиями к их однородности.

К заготовкам крупных размеров, которые по оптической однородности должны отвечать 1-й категории однородности, применяется изолированный или индивидуальный тип укладки с использованием толстых металлических пластин 4 и защитного кольца 3, как это изображено на рис. 23. Внешнее металлическое кольцо 2 служит для ограничения защитного кольца, состоящего из сыпучего материала. Одновременно металлическое кольцо служит для выравнивания температуры по окружности комплекта.

Только самые крупные заготовки с особо высокими требованиями к однородности рационально отжигать по одной в печи. Обычно же в печь укладывают несколько заготовок. При достаточно большом диаметре этих заготовок — не менее $\frac{1}{3}$ диаметра печи — применяют многослойно-изолированный тип укладки, заключающийся в том, что заготовки укладываются стопкой, но прокладываются толстыми металлическими дисками как показано на рис. 17, и окружаются защитным кольцом. При этом, как уже было показано, толстые металлические прокладки создают условия, сходные с условиями при изолированном типе укладки. Если металлические плиты недостаточно толсты, применяются воздушные промежутки, как показано на рис. 24.

Когда радиус заготовок относительно мал — менее $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{4}$ радиуса печи, применяется комбинированная изолированно-многорядовая укладка (рис. 25). При этом каждая заготовка окружается соответствующими металлическими дисками и кольцами, металлическим и защитным. Образовавшиеся таким путем комплекты укладываются в один слой на полку (b) этажерки или на прокладки (a). Между комплектами оставляются небольшие воздушные промежутки.

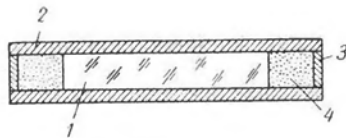


Рис. 23. Схема изолированной укладки крупной заготовки:

1 — заготовка; 2 — металлический диск; 3 — металлическое кольцо; 4 — защитное кольцо

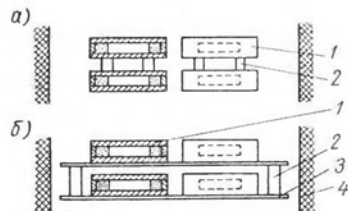


Рис. 24. Схема изолированно-многослойной укладки с воздушными промежутками:

1; 2; 3; 4 — см. рис. 23; 5 — подставки

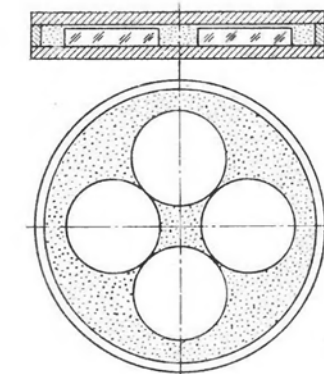


Рис. 26. Схема многорядовой укладки крупных заготовок

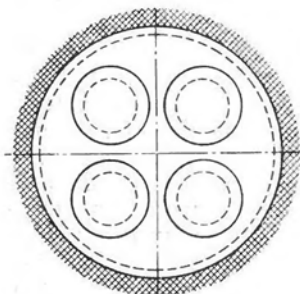
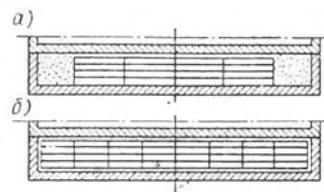


Рис. 25. Схема изолированно-многослойно-многорядовой укладки заготовок:

1 — заготовка в укладочном приспособлении; 2 — подставки; 3 — полки; 4 — печь

Рис. 27. Схема многослойно-многорядовой укладки заготовок среднего и малого размеров: а — с защитным кольцом; б — без кольца



Укладка изолированного типа с применением защитного кольца нужна для заготовок астрономических объективов, объективов телескопических систем, оптических деталей, темновых, интерференционных и поляризационных систем.

Менее ответственные заготовки крупного и среднего размеров укладываются в общее кольцо и засыпаются защитным слоем (рис. 26). Наряду с синтетическим материалом может быть применен обычный кварцевый песок или кизельгур. Это пример многорядовой укладки. На рис. 27 показан пример сочетания многорядовой укладки с многослойной. К заготовкам малого размера обычно применяется многослойно-многорядовый тип укладки без защитного кольца. Основания для этого были изложены в п. 18.

22. Примеры укладки заготовок сложной формы

Значение приемов и способов укладки, а также влияние их на качество стекла до сих пор рассматривалось на примере заготовок в виде плоскопараллельных дисков.

Все изложенное ранее в той или иной степени может быть применимо и к заготовкам другой формы, например, к прямоугольным пластинам, к заготовкам со сферическими (и асферическими) поверхностями. В таких заготовках, как и в плоских дисках, многослойность укладки повышает краевые напряжения, а многорядовая укладка приводит к неравномерности краевых напряжений и возникновению неоднородности как в отдельных заготовках, так и во всем слое, особенно в заготовках, находящихся по краям укладочного приспособления.

Для заготовок сложных форм, как и для дисков, целесообразно применять боковую теплоизоляцию, согласуя форму окружающего заготовку слоя с очертаниями самой заготовки.

Например, для прямоугольных заготовок и теплозащитное кольцо должно быть прямоугольной формы, чтобы обеспечить одинаковую толщину защитного слоя во всех точках периферии заготовки. Возможно, будет более целесообразным усиление защиты углов, которые, как правило, отдают больше тепла, чем средние части боковых сторон заготовок.

Все выведенные ранее закономерности для плоских дисков по существу применимы и для заготовок сложной

формы, но математическое их выражение, естественно, должно быть сложнее и содержать иные параметры. В математической форме зависимости для заготовок, не имеющих вида плоских дисков, пока еще не получили своего решения.

Наиболее трудной группой заготовок в этом смысле являются призмы. Затруднительность выбора благоприятных условий укладки призмённых заготовок связана не только с более сложной их формой, но и с тем, что они, как правило, должны отвечать требованиям однородности в двух, а иногда и в трех направлениях. Поэтому трудно дать общие для всех видов призм рекомендации по их укладке. К каждому из типов следует подходить индивидуально. Рассмотрим условия укладки для некоторых наиболее распространенных типов призмённых заготовок.

Заготовки спектральных призм. К типу спектральных относятся призмы, имеющие преломляющий угол около 30° (рис. 28, а). В такой призме лучи по существу идут только в направлении, перпендикулярном большему катету (указано стрелкой). Предельная величина угла отклонения луча от этого направления не превышает $15-20^\circ$. Поэтому заготовка тридцатиградусной спектральной призмы должна быть однородной цилиндрическим образом в сечении, параллельных большой катетной грани.

Чтобы заготовка приобрела в отжиге такую однородность, нужно, чтобы вдоль ее большой катетной поверхности не было перепада температуры. В хорошо сконструированной и выполненной цилиндрической печи отжига температурный градиент направлен по радиусу печи, а по окружностям — температуры постоянные. Изотермы имеют вид цилиндров, ось которых совпадает с осью печи. Поэтому заготовки нужно укладывать на боковую грань, располагая их большие катетные стороны перпендикулярно радиусам печи, и при этом размещать их попарно, складывая гипотенузными гранями, как показано на рис. 28, б. Такой способ укладки обеспечивает наиболее благоприятное распределение температуры внутри заготовок. Если к призмам предъявляются очень высокие требования по оптической однородности, то целесообразно окружить заготовки со всех сторон защитным кольцом. Для этого между стенкой укладочного приспособления и заготовками надо оставить промежуток,

равный $1\frac{1}{2}-2$ толщинам призмы. Все укладочное приспособление с промежутками между заготовками засыпается вровень с ними теплоизоляционным материалом. При многослойной укладке между слоями необходимо помещать толстые металлические диски.

Заготовки оборачивающих призм. В противоположность заготовкам спектральных призм оборачивающие призмы (призмы Дове) следует располагать вдоль радиуса печи (рис. 29, б). При таком способе укладки направление неоднородности, возникающее в заготовке от градиента температуры по радиусу печи, наиболее близко соответствует направлению пучка лучей в призме (рис. 29, а). В остальном могут быть полезны все рекомендации, относящиеся к спектральным призмам. При этом не следует забывать, что заготовки призм Дове требуют особенно тщательной и продуманной укладки, поскольку даже небольшая неоднородность стекла, вследствие значительной длины пути пучка лучей в призме, может вызвать существенные искажения фронта световой волны, и заготовка может оказаться неудовлетворительной по оптической однородности.

Заготовки призм полного внутреннего отражения. Труднее решаются вопросы, возникающие при укладке заготовок призм с более сложным ходом лучей. К ним относятся призмы полного внутреннего отражения, пентапризмы, крышеобразные, в которых пучок лучей проходит через толщу стекла в двух или трех направлениях. В этих случаях при выборе способа укладки нужно руководствоваться стремлением достичь либо нейтрализации влияния неоднородности, которая может быть вызвана

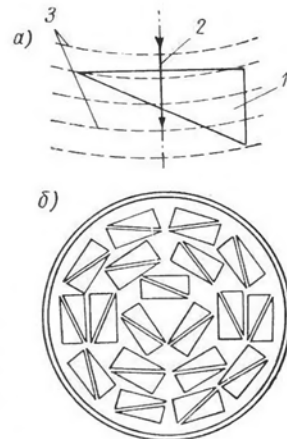


Рис. 28. Схема укладки заготовок спектральных призм: а — ориентирование заготовки 1 с рабочим направлением 2 (совпадает с радиусом печи) относительно изотерм 3; б — схема размещения заготовок

градиентом температуры, либо компенсации разности хода, образовавшейся при прохождении светового пучка через призму в одном направлении, разностью хода, возникающей в пучке при прохождении через призму в другом направлении.

С этой точки зрения заготовки призм полного внутреннего отражения, в которых отражающей является гипоте-

нузи или гипотенузную поверхность так, чтобы гипотенузная плоскость была параллельна радиусу печи, как показано на рис. 30, б. При таком способе укладки направление неоднородности $n_1 - n_2$ является наиболее благоприятным.

Наилучшим из способов укладки заготовок призм был бы такой, при котором каждая из них или каждая пара заготовок, образующая параллелепипед, помещалась бы в отдельную толстостенную металлическую коробку с крышкой. Это обеспечило бы достаточно хорошую изотермичность поверхностей заготовок.

Из изложенного видно, что для того чтобы технически грамотно выбрать тип укладки сложных заготовок, недостаточно знать категории оптической однородности, двойного лучепреломления и другие требования, предъявляемые к ним; необходимо также знать их назначение и условия будущего использования.

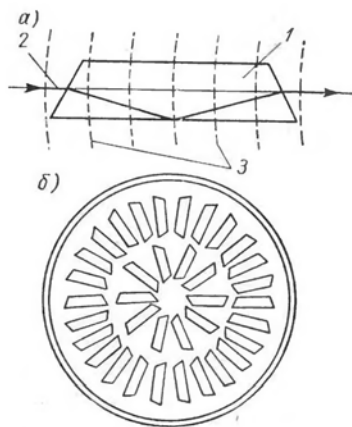


Рис. 29. Схема укладки заготовок призм Дове: а — ориентирование заготовки 1 с ходом луча света 2 относительно изотерм 3; б — размещение заготовок в коробке

нузная грань, следует укладывать на боковую сторону с таким расчетом, чтобы высота заготовки совпадала с радиусом печи. Тогда гипотенузная грань будет касательной к цилиндрическим поверхностям изотерм (рис. 30, а). Если в результате градиента температуры в призме возникает структурная неоднородность $n_1 - n_2$, направленная по высоте призмы, то все лучи, проходящие через призму, должны иметь близкую оптическую длину пути.

Заготовки призм, у которых отражающими являются катетные грани, целесообразно укладывать на боковую

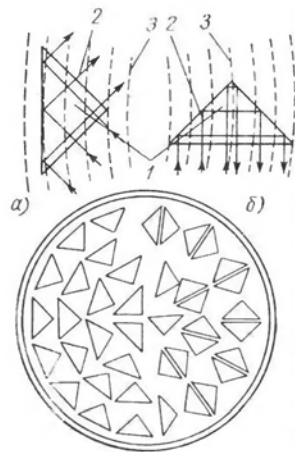


Рис. 30. Ориентирование и схема размещения заготовок призм полного внутреннего отражения при гипотенузной (а) и при катетной (б) отражающей поверхности:

1 — заготовка; 2 — ход лучей; 3 — концентрические изотермы

ПРОЦЕСС ТОНКОГО ОТЖИГА ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА. ТИПЫ ОТЖИГА

23. Этапы процесса отжига

В гл. I были определены главные цели процесса тонкого отжига оптического стекла: придание стеклу оптической однородности, освобождение от напряжений и приведение оптических постоянных, в основном показателя преломления, к требуемым значениям.

Этапом отжига, в течение которого достигаются указанные три цели, является выдерживание стекла при температуре отжига. При этой температуре вся масса стекла в течение более или менее короткого времени достигает одинакового структурного состояния, близкого к равновесному, а напряжения полностью исчезают. Выдержка при постоянной температуре — один из основных этапов отжига.

Следующим, также основным этапом процесса, является медленное охлаждение стекла в области отжига. Задачей данного этапа является сохранение достигнутого качества в пределах отступлений, допускаемых техническими условиями. Этот этап называется «ответственным охлаждением» или «ответственным снижением температуры».

В процессе отжига имеются два вспомогательных этапа: нагревание стекла до температуры отжига и быстрое неотответственное охлаждение его от нижней границы области отжига до температуры помещения.

Технологическая последовательность этапов такова:

- 1) нагревание стекла до температуры отжига;
- 2) выдерживание его при этой температуре;
- 3) ответственное охлаждение;
- 4) неотответственное охлаждение.

В практике производства оптического стекла применяются в основном три типа тонкого отжига: линейный, инерционный и ускоренный. Отжиг указанных типов различается температурой и длительностью выдержки, характером изменения скорости ответственного охлаждения.

Здесь подробно рассматривается отжиг первого типа — линейный, остальные же описаны лишь в той части, в какой они отличаются от линейного.

Этапы отжига рассматриваются в порядке их технологической последовательности.

24. Нагревание заготовок

Нагревание стекла до температуры отжига производят с возможно большей скоростью, допускаемой конструкцией печи, но не вызывающей растрескивания заготовок под действием возникающих в них напряжений. Напряжения в заготовке во время ее нагревания складываются из остаточных и временных (см. п. 3). Остаточные напряжения — результат грубого отжига после прессования. Временные напряжения возникают вследствие перепада температуры, вызванного нагреванием.

Характер распределения и одних, и других напряжений одинаков: во внутренних слоях находятся напряжения растяжения, а в наружных — сжатия. Опасны растягивающие напряжения, так как стекло на растяжение в три раза менее прочно, чем на сжатие.

Из формул (4), (6), (7) следует, что временные напряжения пропорциональны скорости нагревания и обратно пропорциональны квадрату характеристического размера: полутолщины для пластины и радиуса для цилиндра и шара. Напряжения зависят также от механических и термических свойств стекла.

В руководствах по отжигу для расчета скорости нагревания h_n пластины обычно приводится формула:

$$h_n = \frac{30}{b^2} \text{ } ^\circ\text{C/мин} = \frac{1800}{b^2} \text{ } ^\circ\text{C/ч}, \quad (32)$$

где b — полутолщина пластины в см.

Эта зависимость выводится из формулы (4а"), если вместо P_0 подставить $1/4 - 1/5$ средней прочности стекла на разрыв, составляющей примерно 600 кг/см^2 .

Для заготовок малого и среднего размера, независимо от типа их укладки, нет необходимости производить расчет скорости нагревания, так как расчетные скорости намного превышают фактическую, максимальную скорость, развиваемую печью отжига при ее инерционности. При расчете же допустимой скорости нагревания крупных заготовок формулу (32) следует заменить другой. Обычно и к крупным заготовкам применяется укладка многослойного типа. В этом случае нагревание их происходит больше через боковые, чем через плоские поверхности, особенно, если металлические прокладки отсутствуют или недостаточно толсты. Поэтому для расчета допустимой скорости нагревания крупных заготовок следует применить формулу для радиальных напряжений P_r в цилиндре. Принимая то же значение для предельных напряжений, как в формуле (32), получим:

$$h_n = \frac{11}{R^2} \text{ } ^\circ\text{C/мин} = \frac{660}{R^2} \text{ } ^\circ\text{C/ч}, \quad (33)$$

где R — радиус заготовки в см.

Следующий пример иллюстрирует разницу в значениях скорости h_n , рассчитанных по формулам (32) и (33).

Пусть отжигается диск диаметром 40 см и толщиной 6 см. По формуле (32) скорость нагревания $h_n = \frac{1800}{9} = 200^\circ \text{C/ч}$, а по (33) $h_n = \frac{660}{400} = 1,6^\circ \text{C/ч}$.

Эта чрезвычайно большая разница показывает, насколько важно учитывать характер укладки при выборе скорости нагревания.

Формулы (32) и (33) относятся к крайним случаям передачи тепла при нагревании группы заготовок. В реальных случаях существует комбинированная передача тепла через боковые и плоские поверхности. Поэтому в промышленности применяются скорости нагреваний промежуточных значений.

Так, например, для наиболее крупных заготовок, диаметром более 400 мм, применяется скорость нагревания до 5°C/ч , для заготовок диаметром порядка 300—400 мм — до 10°C/ч .

Наиболее мелкие заготовки нагревают со скоростью до 120°C/ч . Скорость нагревания можно не корректировать в зависимости от свойств стекла, поскольку, как

видно из табл. 1, максимальное отклонение коэффициента θ от среднего для стекол разных марок не превышает 30%. Такое отклонение при пятикратном «коэффициенте запаса», принятом в формулах (32) и (33), существенного значения не имеет.

25. Выдерживание стекла при температуре отжига

Задачей второго этапа отжига является приведение всей массы стекла к однородному, равновесному состоянию и освобождение от остаточных напряжений.

Режим выдержки, т. е. ее температура и длительность, определяется требованиями к однородности и двойному лучепреломлению заготовок, а также их размерами.

Температура выдержки стекла одной марки в различных отжигах, как правило, соответствует практической температуре отжига t_n и отклоняется от нее в относительно небольших пределах. Длительность же выдержки меняется очень сильно в зависимости от размеров заготовок и технических условий на качество стекла по однородности и двойному лучепреломлению.

Температура выдержки. В п. 10 были изложены причины, вследствие которых при выдержке стекол пользуются практической температурой t_n вместо «истинной» температуры отжига t_o , отвечающей вязкости $\eta = 10^{13}$ лз. Значение t_n у стекол разных марок отличается от t_o на $5\text{—}20^\circ$, а иногда и более.

Значения t_o [1,12] и t_n (ГОСТ 13659—68) для некоторых, наиболее часто применяемых стекол ГОСТа 3514—67 приведены в табл. 9.

Для выдержки стекла не всегда пользуются практической температурой t_n . В зависимости от технических условий на стекло, их формы и размеров иногда отступают от t_n как в сторону повышения, так и в сторону понижения. Так, например, когда нужно получить в стекле однородность высокой категории или в партии заготовок однородность по показателю преломления высокого класса, выдержку проводят при температуре на $10\text{—}20^\circ$ выше t_n . И. М. Бужинский и И. И. Кириллова [7] применяли с этой целью и рекомендуют для широкого использования повышение температуры выдержки на $30\text{—}60^\circ$ относительно t_n . Высокую однородность партии они получали

Таблица 9

| Марка стекла | Температура отжига в °C | | $\Delta l = l_n - l_g$ | Марка стекла | Температура отжига в °C | | $\Delta l = l_n - l_g$ |
|--------------|-------------------------|--------------------|------------------------|--------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| | истинная l_g | практическая l_n | | | истинная l_g | практическая l_n | |
| K3 | 528 | 560 | +32 | БФ12 | 479 | 460 | -19 |
| K8 | 543 | 560 | +17 | Ф1 | 461 | 460 | -1 |
| БК6 | 538 | 560 | +22 | Ф2 | 453 | 460 | +7 |
| БК10 | 576 | 570 | -6 | ТФ3 | 432 | 420 | -12 |
| ТК2 | 614 | 620 | +6 | ТФ5 | 426 | 420 | -6 |
| ТК16 | 647 | 650 | +3 | ТФ7 | 383 | 400 | +17 |
| СТК9 | 630 | 630 | 0 | ОФ2 | 466 | 480 | +14 |
| БФ8 | 544 | 520 | -24 | | | | |

при применении скорости ответственного охлаждения большей, чем по нормали. Однако с нашей точки зрения повышение на 60° чрезмерно велико и грозит деформацией заготовок, особенно тонких, что в действительности нередко случается. Этот прием применим к заготовкам с большими припусками относительно заданных размеров.

Г. Петер [32] также считает целесообразным применение такого приема для повышения однородности партии стекла по показателю преломления: он рекомендует повышать температуру выдержки на 20—40° (в зависимости от марки стекла).

Обоснование целесообразности проведения выдержки стекла при повышенной температуре будет дано при рассмотрении этапа ответственного снижения температуры. Понижение температуры выдержки относительно t_n рекомендуется в тех случаях, когда к стеклу предъявляются высокие требования по двойному лучепреломлению, а по оптической однородности и однородности партии по показателю преломления оно может отвечать низким требованиям. В указанном случае понижение температуры выдержки дает возможность ускорить ответственное снижение и этим сократить цикл отжига. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в п. 31.

Следует также понижать температуру выдержки при отжиге очень «тонких» заготовок, таких, у которых толщина в 10 и более раз меньше диаметра, особенно, если они сделаны из «короткого» стекла (мал интервал между температурами отжига и деформации); такие заготовки могут легко деформироваться или спекаться между собой при длительной выдержке и большом давлении выше лежащих заготовок. В этом случае следует понизить температуру выдержки на 10—15° C.

Длительность выдержки. В пп. 6 и 7 уже упоминалось о том, что стремление показателя преломления к равновесному значению и релаксация напряжений — процессы не линейные. Было показано, что при температурах верхней части области они в первом приближении подчиняются гиперболической зависимости от времени (при выдерживании стекла при постоянной температуре), как это следует из выражений (14) и (16а). Поэтому повышение требований к качеству стекла по однородности и двойному лучепреломлению влечет за собой значительное увеличение длительности выдержки. Но не только этим определяется длительность выдержки. Она должна включать в себя также и время, необходимое для полного прогрева стекла и устранения перепадов температуры, возникающих во время нагревания.

Если длительность релаксационных и структурных процессов зависит, главным образом, от температуры и лишь косвенно связано с размерами заготовки, то, напротив, время, необходимое для выравнивания температуры в стекле, главным образом определяется размерами отдельной заготовки или габаритными размерами группы заготовок в печи.

Определим сначала время, необходимое для релаксационных изменений. Чтобы показать, как меняется время выдержки в зависимости от температуры, приведем некоторые экспериментальные результаты изучения изменения показателя преломления, полученные А. И. Стожаровым [20] и В. А. Флоринской [24], а также результаты изучения релаксации напряжений, полученные Адамсом и Вильямсоном [26]. Данные Стожарова по шести стеклам приведены в табл. 10. Для каждого стекла при трех температурах даны начальные отклонения Δl_1 от соответствующего равновесного значения и отклонения Δl_2 после выдержки в течение времени t . Вычислено также отно-

Таблица 10

| Температура выдержки t в $^{\circ}\text{C}$ | Отклонения от равновесного показателя преломления $\Delta n \cdot 10^4$ | | | Время выдержки t в мин | Температура выдержки t в $^{\circ}\text{C}$ | Отклонения от равновесного показателя преломления $\Delta n \cdot 10^4$ | | | Время выдержки t в мин |
|---|--|--------------|---------------------------------|--------------------------------|---|--|--------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | Δn_1 | Δn_2 | $\frac{\Delta n_2}{\Delta n_1}$ | | | Δn_1 | Δn_2 | $\frac{\Delta n_2}{\Delta n_1}$ | |
| K17 (C—1) | | | | | БФ7 (C—5) | | | | |
| 574 | 7,4 | 2,7 | 0,36 | 4 | 542 | 3,9 | 1,0 | 0,26 | 10 |
| 552 | 6,6 | 2,3 | 0,35 | 18 | 530 | 5,7 | 1,7 | 0,30 | 19 |
| 527 | 6,5 | 2,3 | 0,35 | 192 | 518 | 7,5 | 2,5 | 0,32 | 71 |
| БК7 (C—4) | | | | | БФ5 (C—2) | | | | |
| 558 | 9,0 | 3,4 | 0,38 | 11 | 574 | 8,5 | 4,0 | 0,47 | 5 |
| 545 | 7,0 | 3,2 | 0,46 | 23 | 547 | 7,2 | 4,6 | 0,64 | 13 |
| 519 | 7,7 | 3,6 | 0,47 | 137 | 527 | 7,4 | 4,6 | 0,62 | 139 |
| TK2 (C—6) | | | | | Ф4 (C—3) | | | | |
| 604 | 6,1 | 1,0 | 0,17 | 15 | 527 | 4,2 | 0,8 | 0,19 | 5 |
| 585 | 6,1 | 1,8 | 0,30 | 58 | 470 | 4,0 | 0,6 | 0,15 | 35 |
| 558 | 6,1 | 2,1 | 0,35 | 124 | 452 | 3,2 | 0,6 | 0,19 | 136 |

Примечание. В скобках даны старые обозначения марок стекла.

Примечание. В скобках даны старые обозначения марок стекла.

шение $\Delta n_1/\Delta n_2$, характеризующее степень уменьшения отклонения Δn .

Аналогичные результаты, полученные Флоринской для стекол БК10 и Ф1 в течение промежутков времени, исчислявшихся сотнями и тысячами часов, даны в табл. 11. Значения величин такие же, как и в табл. 10.

Данные Адамса и Вильямсона о продолжительности релаксации напряжений от 50 до 2,5 нм/см (т. е. для уменьшения их в 20 раз) при различной температуре приведены в табл. 12.

Из сопоставления температур в табл. 9 и 12 можно видеть, что температура t_0 ($\eta = 10^{13}$ пз) возможно и не соответствует температуре, при которой 95% напряжений релаксируют в течение 2 мин, но во всяком случае этот процесс занимает очень немного времени: около 10 мин или немного более.

Данные же, приведенные в табл. 10 и 11, ясно показывают, что структурные изменения протекают значительно

Таблица 11

| Температура выдержки t в °C | Отклонения от равновесного показателя преломления $\Delta n \cdot 10^4$ | | | Время выдержки t в ч |
|-------------------------------------|--|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | начальное Δn_1 | в момент Δn_2 | $\frac{\Delta n_2}{\Delta n_1}$ | |
| Стекло БК10 | | | | |
| 562 | 4,0 | 0,0 | 0 | $< 3^1$ |
| 550 | 3,5 | 0,7 | 0,2 | ~ 50 (~ 2 суток) |
| 530 | 12,3 | 2,4 | $\sim 0,2$ | 216 (9 суток) |
| Стекло Ф1 | | | | |
| 463 | 2,71 | 0,0 | 0 | ~ 50 (~ 2 суток) |
| 448 | 1,50 | 0,07 | $\sim 0,05$ | 168 (7 суток) |
| 420 | 10,23 | 0,53 | $\sim 0,05$ | 3984 (166 суток) |

¹ Δn_2 измерено через 3 ч после начала выдержки.

¹ Δn_2 измерено через 3 ч после начала выдержки.

Таблица 12

| Тип стекла | Температура в °C релаксации напряжений за время | | | | |
|------------------------|--|--------|-----|-----|------|
| | 2 мин | 10 мин | 1 ч | 5 ч | 24 ч |
| Боросиликатный крон | 599 | 575 | 549 | 526 | 505 |
| Крон обыкновенный | 573 | 549 | 522 | 498 | 475 |
| Легкий баритовый крон | 606 | 584 | 559 | 538 | 516 |
| Тяжелый баритовый крон | 638 | 619 | 599 | 580 | 563 |
| Баритовый флинт | 556 | 531 | 503 | 478 | 454 |
| Легкий флинт | 461 | 439 | 416 | 395 | 374 |
| Средний флинт | 464 | 445 | 425 | 407 | 389 |
| Тяжелый флинт | 454 | 435 | 414 | 395 | 377 |
| Очень тяжелый флинт | 434 | 412 | 389 | 368 | 347 |

медленнее, чем релаксация напряжений. Если отклонение показателя преломления от равновесного значения составляет несколько единиц четвертого десятичного знака, что обычно и бывает в неотожженных заготовках, то за время около 10 мин изменение составляет лишь 60—40% от первоначального значения Δn_1 (табл. 10). Для получения равновесного значения даже при температуре, близкой к t_0 или t_n , требуется несколько часов, а иногда, например для стекла Ф1, и десятков часов. При повышении температуры по сравнению с t_0 этот процесс значительно ускоряется; этим пользуются в тех случаях, когда нужно обеспечить высокую однородность стекла в заготовке или в партии. Так, например, по данным В. А. Флоринской [24], при $t = 620^\circ$ (на 50° выше t_n) показатель преломления стекла БК10 ранее чем через 3 ч достигал равновесного значения, изменяясь при этом на $26 \cdot 10^{-4}$. Показатель преломления стекла Ф1 при $t = 495^\circ$ (на 35° выше t_n) менее чем за 3 часа достигает своего равновесного значения, изменяясь на $10 \cdot 10^{-4}$.

Оба процесса: уменьшение отклонения Δn показателя преломления от равновесного значения и релаксация напряжений Δn асимптотически приближаются к нулю; поэтому, чем меньше должны быть конечные значения Δn_τ и δn_τ , тем больше должно быть время выдержки. В отношении Δn это хорошо видно из рис. 11 и сопоставления значений, приведенных в табл. 10 и 11. При практической температуре отжига t_n время, необходимое для достижения конечного значения $\Delta n_\tau \approx 1-3 \cdot 10^{-4}$, составляет около 10 мин; но для того, чтобы при той же температуре конечное значение Δn_τ достигло величины, близкой к нулю (точность метода измерения $\Delta n_\tau \leq 3 \cdot 10^{-6}$), требуются уже часы и даже десятки часов.

В табл. 12 приводятся длительности выдержек, необходимых для ослабления напряжений до 2,5 нм/см. Допуск же на двойное лучепреломление по первой категории равен 2 нм/см. Учитывая, что в процессе ответственного охлаждения должны возникнуть небольшие остаточные напряжения, необходимо, чтобы во время выдержки напряжения, имевшиеся в стекле до отжига, уменьшились не до 2,5, а до 1 нм/см или до еще меньшего значения. Для этого потребуются более длительная выдержка. Длительность ее можно приближенно рассчитать исходя из формулы (14). Согласно данным второй строки табл. 12,

для уменьшения двойного лучепреломления от $\delta n_0 = 50$ нм/см до $\delta n_1 = 2,5$ нм/см необходимо время $\tau_1 = 10$ мин.

Нужно найти время τ_2 , в течение которого двойное лучепреломление уменьшится до 1 нм/см. Подставляя эти значения в формулу (14) и пренебрегая дробью $\frac{1}{\delta n_0} = \frac{1}{50}$, которая значительно (в 20—50 раз) меньше $\frac{1}{\delta n_1} = \frac{1}{2,5}$ и $\frac{1}{\delta n_2} = 1$, получим $\frac{1}{\delta n_1} \approx A\tau_1$ и $\frac{1}{\delta n_2} \approx A\tau_2$.

Из отношения этих двух равенств $\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\delta n_1}{\delta n_2}$ получим

$$\tau_2 \approx \tau_1 \frac{\delta n_1}{\delta n_2}. \quad (34)$$

Подставляя в (34) значения δn_1 , δn_2 и τ_1 , найдем время τ_2 , необходимое для уменьшения двойного лучепреломления до 1 нм/см: $\tau_2 = 10 \frac{2,5}{1} = 25$ мин. Чтобы уменьшить его до 0,5 нм/см потребуется 50 мин.

Длительность выдержки, необходимая для такого значительного уменьшения напряжений, все же меньше той, которая нужна для достижения полной однородности стекла.

При понижении температуры выдержки (стр. 86) скорость релаксации напряжений и особенно скорость протекания структурных преобразований сильно замедляется. В связи с этим удлинняется время выдержки, необходимое для полного отжига стекла. Однако для получения достаточно однородного стекла нет необходимости выдерживать его до полного достижения равновесного значения показателя преломления всеми его точками: можно ограничиться выдержкой меньшей длительности. Это обусловливается двумя причинами.

Первая причина — уменьшение разности показателя преломления разных точек стекла по мере приближения его к равновесному состоянию. Пусть в точках 1 и 2 стекла в начале выдержки показатель преломления отличается от равновесного соответственно, на $\Delta n'_0$ и $\Delta n''_0$, а по истечении времени τ — на $\Delta n'_\tau$ и $\Delta n''_\tau$. Тогда исходя из формулы (15) можно написать $\frac{1}{\Delta n'_\tau} - \frac{1}{\Delta n''_\tau} = \frac{1}{\Delta n'_0} - \frac{1}{\Delta n''_0}$

(A и τ для обеих точек одинаковы), откуда получаем

$$\frac{\Delta n'' - \Delta n'}{\Delta n_0'' - \Delta n_0'} = \frac{\Delta n' \Delta n''}{\Delta n_0' \Delta n_0''} \approx \frac{\overline{\Delta n}^2}{\overline{\Delta n_0}^2},$$

где $\overline{\Delta n}$ — среднеегеометрическое $\Delta n'$ и $\Delta n''$;

$\overline{\Delta n_0}$ — среднеегеометрическое $\Delta n_0'$ и $\Delta n_0''$.

Тогда

$$\Delta n'' - \Delta n' = (\Delta n_0'' - \Delta n_0') \frac{\overline{\Delta n}^2}{\overline{\Delta n_0}^2}. \quad (35)$$

Пример. Пусть $\overline{\Delta n_0} = 1 \cdot 10^{-3}$, $\Delta n_0'' - \Delta n_0' = 2 \times 10^{-4}$ и $\overline{\Delta n} = 1 \cdot 10^{-4}$.

Тогда

$$\Delta n'' - \Delta n' = 2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-3}} \right) = 2 \cdot 10^{-6}.$$

Однородность стекла в точках 1 и 2 уже достаточно высока. Времени же, необходимого для того чтобы само

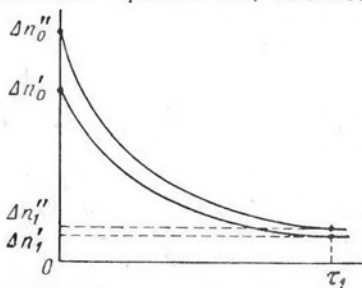


Рис. 31. Сближение показателей преломления двух точек стекла во время его выдержки при постоянной температуре

стекла от равновесного значения в зависимости от длительности выдержки изображено на рис. 31.

Вторая причина, позволяющая не доводить полностью показатель преломления разных точек стекла до полного сближения, — это одинаковый в определенных условиях ход по одной равновесной кривой показателя преломления разных точек стекла, если даже в начале он был различным. Определенные условия, как было показано Е. Э. Данишевским (п. 7), заключаются в достаточно высокой

отклонение показателя преломления точек 1 и 2 от равновесного значения уменьшить до такого же значения 2×10^{-6} , понадобится примерно в 50 раз больше, чем для его понижения до $1 \cdot 10^{-4}$ [это легко подсчитать из обратной зависимости $\tau \Delta n$, составленной аналогично формуле (34)].

Сближение отклонений Δn показателя преломления разных точек

начальной температуре и постоянной скорости охлаждения всех точек.

Теперь определим время, необходимое для выравнивания температуры в массе стекла.

Пусть температура печи и поверхности стекла достигла температуры выдержки t_n и поддерживается постоянной. Температура же центра стекла t_0 ниже t_n . По мере выдерживания стекла при t_n температура центра повышается и по истечении времени τ она будет равна t_τ . Первоначальный перепад температуры равен $\Delta t_0 = t_n - t_0$, а в момент τ он становится $\Delta t_\tau = t_n - t_\tau$. Относительное изменение перепада температуры за время τ будет $\frac{\Delta t_0}{\Delta t_\tau}$.

Время τ можно рассчитать [13] по формулам: для пластины с полутолщиной b

$$\frac{\Delta t_\tau}{\Delta t_0} = 1,03e^{-2,47 \frac{a\tau}{b^2}}; \quad (36)$$

и для цилиндра с радиусом R и полувысотой, равной радиусу,

$$\frac{\Delta t_\tau}{\Delta t_0} = 1,14e^{-8,23 \frac{a\tau}{R^2}}, \quad (37)$$

где a — эффективная температуропроводность.

Пластина является моделью крупной заготовки при изолированной ее укладке, а цилиндр — моделью печи, плотно загруженной стеклом.

На рис. 32 показана продолжительность выравнивания температуры в пластине до значения $\Delta t_\tau : \Delta t_0$, равного 0,01 и 0,001 в зависимости от ее полутолщины b .

На рис. 33 показана аналогичная зависимость от радиуса R при отношении $\Delta t_\tau : \Delta t_0$, равном 0,05 и 0,01 для цилиндра, высота которого равна диаметру.

Из сопоставления длительности выравнивания температуры в стеклянных пластине и цилиндре с данными о скорости выравнивания показателя преломления в стекле [табл. 11 с учетом поправки на длительность τ по формуле (35)] вытекают следующие выводы.

Если крупная заготовка или коробка, плотно загруженная мелкими заготовками, уложена в печь так, что теплоотдача ее больших поверхностей не затруднена, то при ее толщине до 5—6 см ($b = 2,5$ —3 см) длительность

процесса выравнивания показателя преломления преобладает над временем, необходимым для выравнивания температуры. В этом случае она определяет собой длительность выдержки, поскольку оба процесса идут одновременно.

Если толщина заготовки или коробки порядка 6 см, то длительности обоих процессов близки, и при расчете длительности выдержки нужно учитывать продолжительность обоих процессов. При дальнейшем увеличении толщины

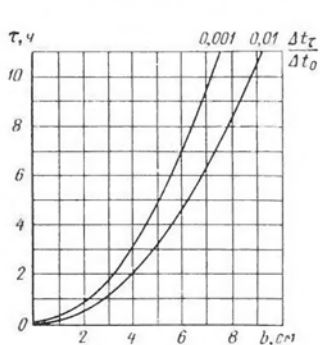


Рис. 32. Зависимость времени τ выравнивания температуры в пластине от ее полутолщины b

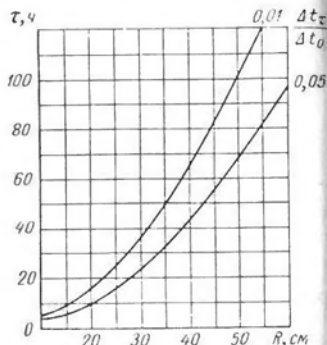


Рис. 33. Зависимость времени τ выравнивания температуры в цилиндре от его радиуса R

пластины длительность процесса выравнивания температуры все больше превалирует над длительностью выравнивания показателя преломления.

Если укладка заготовок соответствует многослойно-многорядовому типу, т. е. если они плотно заполняют коробки или другие укладочные приспособления, а металлические прокладки тонки и воздушные промежутки отсутствуют, то время выравнивания температуры во много раз превышает продолжительность процесса выравнивания показателя преломления. В таких случаях длительность выдержки на втором этапе отжига целиком определяется временем, необходимым для выравнивания температуры в печи. Это следует учитывать при выборе способа укладки заготовок и определении длительности выдержки.

На практике обычно не производят расчета длительности выдержки для каждой партии заготовок, уложен-

ных в печь. Вместо этого применяют соответствующий размеру заготовок и их категории или классу однородности типовой режим выдержки, установленный технологической нормалью. Для заготовок крупного размера обычно применяются режимы выдержки длительностью от 48 до 120 ч, а для средних и мелких — от 3 до 24 ч. Чем выше категория оптической однородности и класс однородности партии по показателю преломления, тем более длительная применяется выдержка. При плотной укладке заготовок в тонкостенные коробки, не обеспечивающие эффективного выравнивания температуры, следует применять режим с более длительной выдержкой, чем при укладке в толстостенные укладочные приспособления или при наличии воздушных зазоров между ними.

Типовые режимы выдержки содержат «коэффициент запаса», обусловленный тем, что вместо t_0 применяется практическая температура t_n и что для многих стекол еще не известно высокотемпературное значение коэффициента температуропроводности a .

26. Ответственное охлаждение в линейном отжиге. Переходный период

В линейном отжиге этап ответственного охлаждения характеризуется тем, что скорость охлаждения печи в течение всего этого этапа сохраняется постоянной. Следовательно, изменение температуры происходит в линейной зависимости от времени, согласно уравнению

$$t_{\tau} = t_0 - h\tau, \quad (38)$$

где t_0 — температура в начале охлаждения (температура выдержки);

t_{τ} — температура в момент времени τ ;

h — постоянная скорость охлаждения.

Отсюда происходит и название режима этого типа. Как уже отмечалось в п. 2, при постоянной скорости охлаждения в теле сохраняется постоянный перепад температуры. Постоянство скорости охлаждения позволяет рассматривать ответственное охлаждение как регулярный режим и применять к нему соответствующие формулы теплотехники.

Однако переход от выдержки при постоянной температуре, одинаковой во всех точках тела, к равномерному охлаждению при постоянном перепаде температуры не

может совершиться по всей массе стекла одновременно. Неизбежен переходный период, в течение которого постепенно устанавливается регулярный режим. Можно считать, что тонкий поверхностный слой стекла начинает равномерно охлаждаться одновременно с печью. Слой же стекла, удаленные от поверхности, начинают охлаждаться позднее с постепенно увеличивающейся скоростью. При этом, чем дальше от поверхности расположен слой, тем с большим отставанием и более замедленно происходит его переход от выдержки к равномерному охлаждению. Наиболее отстающей является центральная зона.

Для того чтобы стекло в процессе охлаждения не приобрело структурной неоднородности, необходимо, как было показано в п. 7, чтобы переходный период завершился в области «высоких температур, при которых структурные преобразования протекают достаточно быстро. Такими «высокими» являются температуры, лежащие в интервале, близком к температуре отжига t_B . Этот интервал температур неодинаков для разных стекол — величина его определяется скоростью нарастания вязкости стекла. Чем меньше температурный коэффициент вязкости (чем «длиннее» стекло), тем ниже может быть предельная температура, ограничивающая переходный период.

Будем характеризовать переходный период интервалом температуры или длительностью.

Длительность τ переходного периода в зависимости от теплофизических свойств стекла и его размеров можно определить из критерия Фурье $F_0 = \frac{a\tau}{\sigma^2}$, где a — температуропроводность, σ — толщина прогреваемого слоя; для пластины это полутолщина — b , а для цилиндра и шара — радиус R . При регулярном режиме критерий Фурье имеет следующие значения: для пластины $F_0 \geq 1$, для шара $F_0 \geq 0,34$. С помощью этих значений найдем граничные значения τ_{nn} , т. е. длительность переходного периода для пластины

$$\tau_{nn} = \frac{b^2}{a}, \quad (39a)$$

для шара

$$\tau_{nn} = 0,34 \frac{R^2}{a}. \quad (39б)$$

Из формулы (38) с помощью (39a), (39б) и (1a), (3a) получаем выражение для температурного интервала переходного периода:

для пластины

$$t_0 - t_{\tau} = \frac{hb^2}{a} = 2\Delta t; \quad (40a)$$

для шара

$$t_0 - t_{\tau} = \frac{hR^2}{3a} = 2\Delta t. \quad (40б)$$

Формулы (39) и (40) показывают, что температурный интервал и длительность переходного периода возрастают пропорционально квадрату увеличения характеристического размера (полутолщины или радиуса). Они увеличиваются также с уменьшением способности стекла проводить температуру. Компенсировать их влияние можно лишь путем уменьшения скорости охлаждения стекла. Поскольку более действенным фактором является размер заготовки, то можно заключить, что сохранения температурного интервала переходного периода при увеличении размера заготовок можно достичь лишь путем уменьшения скорости охлаждения h в отношении обратно пропорциональном квадрату увеличения их размера.

И. М. Бужинский и И. П. Кириллова [7], применявшие выдержку при температуре на 30—60° выше практической температуры отжига t_n , достигали смещения переходного периода в область температур, при которых структурные изменения протекают чрезвычайно быстро. Это позволило проводить ответственное охлаждение со скоростью в 5—8 раз большей, чем обычно применяемая. В результате этого однородность партии заготовок по показателю преломления заметно повысилась: эта однородность стала отвечать классу А, в то время как при выдержке при t_n и медленном охлаждении однородность партии часто получалась более низкой.

Некоторые данные Бужинского и Кирилловой приведены в табл. 13. Повышение нижней температурной границы переходного периода особенно существенно для «коротких» стекол, обладающих большим температурным коэффициентом вязкости и стекол с большим значением коэффициента m в формуле (19). Наиболее «короткими»

| Марка стекла | Скорость ответственного охлаждения в °C/ч | Температура выдержки в °C | | Разность температур $t_n - t_n'$ | Однородность партии $\Delta n \cdot 10^6$ | Класс однородности партии по ГОСТу 3514-67 |
|--------------|---|---------------------------|-------------------|----------------------------------|---|--|
| | | практическая t_n | измененная t_n' | | | |
| ТК14 | 2,5 | 630 | 610 | -20 | 11-28 | В |
| | 12 | | 680 | 50 | 1-3 | А |
| | 20 | | 660 | 30 | 14 | В |
| | 20 | | 680-690 | 50-60 | 2-9 | А-Б |
| ТК16 | 2,5 | 640 | 610 | -30 | 9-31 | Б-В |
| | 15 | | 600 | -40 | 33 | В |
| | 12-14 | | 680-700 | 40-60 | 6-10 | Б |
| | 20 | | 680 | 40 | 0-5 | А |
| ТФ5 | 2,5 | 430 | 400 | -30 | 7-21 | Б-В |
| | 2,5-3 | | 440-450 | 0-20 | 2-4 | А |

стеклами являются тяжелые (рис. 13) и сверхтяжелые кроны. Они же обладают наиболее высоким значением m , как это можно видеть на стр. 33.

Однако у коротких стекол нельзя сильно повышать температуру выдержки, так как это может повести к деформации заготовок.

Эти стекла требуют короткого переходного периода (в узких температурных границах). Поэтому, несколько повышая температуру выдержки, нужно производить ответственное охлаждение с малой скоростью.

Сокращения температурного интервала переходного периода можно также достичь применением укладки изолированного типа с таким расчетом, чтобы характеристический размер заготовки или группы заготовок в коробке, которую будем рассматривать как сплошной стеклянный диск, был возможно меньшим.

Скорость охлаждения в зависимости от требуемой оптической однородности стекла. При выборе скорости ответственного охлаждения нужно исходить не только из характеристического размера заготовки, но и из технических условий по оптической однородности, однородности партии по показателю преломления, двойному лучепреломлению и по оптическим постоянным.

Рассмотрим последовательно приемы и способы выбора скорости охлаждения исходя из каждого показателя качества в отдельности.

Начнем с наиболее важного из них — оптической однородности.

К сожалению, до настоящего времени не разработано теоретически обоснованных и в то же время достаточно простых формул для расчета степени однородности заготовки оптического стекла, например, в форме диска в зависимости от скорости охлаждения. Е. Э. Данюшевский [10] определил условие, при котором в конце переходного периода, когда скорости охлаждения центра h_n и поверхности h_n стекла почти одинаковы (разность не превышает $0,01h_n$), разность показателя преломления в нем не превышает $1 \cdot 10^{-6}$, т. е. стекло очень однородно:

$$\frac{2M}{K} \sqrt{\frac{\beta \cdot 10^{KT-L}}{h_n}} \geq 4, \quad (41)$$

где M — модуль десятичных логарифмов;
 K и L — константы из уравнения Стожарова (17);
 β — температурный коэффициент показателя преломления в области отжига.

Неравенство (41) является условием, при котором скорость структурных преобразований достаточно велика и эти преобразования успевают происходить по мере понижения температуры.

Преобразуя это условие (41) с уравнением распределения температуры Адамса и Вильямсона [34] для цилиндра неограниченной длины, Данюшевский вывел условие, связывающее скорость охлаждения h с радиусом массы стекла в печи R_n и эффективной температуропроводностью стекла a_n :

$$\lg \frac{2M}{K} \sqrt{\beta A} - \frac{1}{2} \lg h - \frac{0,55K}{2} h \frac{R_n^2}{a_n} \geq \lg 4, \quad (41a)$$

где A — температурная постоянная в формуле Стожарова (16а); согласно (17а) $A = 10^{K(1-L)}$.

Масса стекла в печи рассматривается как сплошной стеклянный цилиндр с высотой, равной диаметру. Коэффициент температуропроводности a_n относится к средней температуропроводности стекла и вещества, заполняющего промежутки между заготовками.

Условие, выраженное этой формулой, означает, что переходный период заканчивается в области высоких температур — около t_n .

Таблица 14

| Диаметр D_1 в мм | Скорость охлаждения h в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ | Диаметр D_1 в мм | Скорость охлаждения h в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ |
|--------------------|---|--------------------|---|
| 1000 | 0,8 | 400 | 3,0 |
| 800 | 1,0 | 300 | 4,8 |
| 600 | 1,6 | 200 | 9,0 |

Принимая средние значения [10] для величин: $A = 1200$, $\beta = 4 \cdot 10^{-5}$, $K = 0,03$, $a_n = 0,24 \text{ см}^2/\text{мин}$, получим

$$\lg h + 0,069 R_n^2 h \leq 0,4. \quad (41б)$$

Скорость выражена в $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Придавая различные значения R_n , можно рассчитать соответствующие им предельные значения скорости охлаждения, необходимые для того, чтобы однородность в массе стекла в форме цилиндра со средними свойствами была не ниже $1 \cdot 10^{-6}$. Значения h для радиуса от 100 до 500 мм приведены в табл. 14. Вместо радиуса R приведены соответствующие значения диаметра D . Величина h дана в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

При учете свойств стекол разного состава значения скорости охлаждения h немного изменяются. Наибольшее отклонение значения h для стекол разного состава не превышает 10%.

Формула (41б) позволяет рассчитать скорость охлаждения, при которой только структурные неоднородности (первого рода) не выходят за пределы $1 \cdot 10^{-6}$.

Е. Э. Данюшевский [11] вывел также зависимость, связывающую неоднородность второго рода в стекле в форме диска со скоростью его охлаждения h' , при условии безградиентности печи, т. е. при отсутствии перепада температуры по радиусу плоских поверхностей диска:

$$W_{na} = 0,149 h' b^3. \quad (42)$$

(Штрих внесен, чтобы отличить h' от h в табл. 14.)

Здесь W_{na} — волновая абберация, т. е. степень отклонения фронта световой волны от плоскости, выраженная в числе длин волн;

h' — скорость охлаждения в $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$;

b — полутолщина стеклянного диска.

Коэффициент 0,149 справедлив лишь для дисков с $R/b = 6,8$. Отношение $R/b = D/2b \approx 7$ наиболее часто встречается в заготовках линз различных размеров, особенно в крупных.

Принимая для 1-й категории однородности, согласно условию Релея, $W_{na} \leq 0,25$ (условие для получения хорошего дифракционного изображения малой точки) и решая уравнение (42) относительно h' , получим:

$$h' \leq \frac{0,25 \cdot 60}{0,149 b^3} = \frac{101}{b^3} \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{ч}.$$

(42а)

Можно считать, что в крупных заготовках, обладающих волновой абберацией $W_{na} = 0,25$, наибольшая разность показателей преломления, образующая неоднородность второго рода (фотоупругая неоднородность), близка к $1 \cdot 10^{-6}$. Для разных значений D и отвечающих им из отношения $\frac{D}{2b} = 6,8$ значений $2b$ по формуле (42а)

рассчитаны скорости охлаждения, при которых фотоупругая неоднородность близка к $1 \cdot 10^{-6}$. Значения D , соответствующие им значения b и вычисленные значения приведены в табл. 15.

Для вычисления краевого двойного лучепреломления Е. Д. Данюшевский пользовался значениями коэффициента линейного расширения α и коэффициента температуропроводности a при нормальной температуре, а не для области обжига. Поэтому в формулу (42) следует внести поправочный коэффициент (см. п. 3), который округленно принят равным 2. Тогда в формулах (42) и (42а) вместо 0,149 будет стоять 0,3 и все значения скорости

Таблица 15

| Размеры заготовки в мм | | Скорость охлаждения в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ | |
|------------------------|-----------------|---|-------|
| диаметр D | полутолщина b | h' | h'' |
| 1000 | 74 | 0,25 | 0,13 |
| 800 | 54 | 0,5 | 0,25 |
| 600 | 45 | 1 | 0,5 |
| 400 | 30 | 4 | 2 |
| 300 | 26 | 10 | 5 |
| 200 | 15 | 30 | 15 |

охлаждения h' уменьшатся вдвое. Эти исправленные значения h'_u скорости охлаждения даны в последнем столбце табл. 15. Условие, принятое при выводе формулы (42) и при вычислении значений h' в табл. 15 — отсутствие перепада температуры на поверхности диска — практически не выполнимо. Оно может быть осуществлено лишь при отжиге очень крупных, уникальных заготовок, когда в печи находится только одна такая заготовка. Обычно же заготовки укладываются по несколько штук, но для приближения к условиям изотермичности поверхности они перемежаются с толстыми металлическими дисками и разделяются воздушными промежутками. При этом, как показано в п. 19, по радиусу поверхности заготовки остается минимальный перепад температуры, обусловленный скоростью охлаждения, теплофизическими свойствами металла и радиусом дисков. Этот перепад температуры вызывает дополнительное краевое двойное лучепреломление, которое согласно формуле (13') примерно равно тридцатикратному значению перепада. Соответственно увеличивается и неоднородность 2-го рода. Вследствие этого для получения той же степени однородности и той же волновой aberrации W_{na} скорость охлаждения h' должна быть значительно уменьшена.

Пример. Пусть имеется диск из стекла К8 диаметром 400 мм и толщиной 60 мм. Согласно табл. 15, для получения высокой однородности, при которой $W_{na} = 0,25$, нужно применить $h'_u = 2^\circ \text{C/ч}$. Заменив в уравнении (42) с исправленным коэффициентом $(0,3)hb^2$ на выражение $3\delta n_a B\theta$, найденное из формулы (12), и решив его относительно δn_a , получим

$$\delta n_a = \frac{W}{0,3b} \frac{B\theta}{3}.$$

Подставив значения $W = 0,25$, $b = 3 \text{ см}$ и $B\theta/3 = 50$ (для К8 из табл. 3) и полагая, что поверхность диска изотермична, найдем

$$\delta n_a = \delta n_k = \frac{0,25 \cdot 50}{0,3 \cdot 3} = 14 \text{ нм/см}.$$

Теперь учтем перепад температуры на поверхности диска. Если металлические прокладки достаточно толсты, то перепад температуры в них для диаметра 400 мм и скорости охлаждения 2°C/ч найдем по номограмме на рис. 19. Он равен $0,23^\circ \text{C}$. Этот перепад должен вызвать краевое дополнительное напряжение $\delta n_k = 37 \cdot 0,23 = 11 \text{ нм/см}$ (см. табл. 3), т. е. на 80% больше заданного.

Следовательно, скорость охлаждения необходимо уменьшить примерно в два раза, т. е. она должна быть равна 1, если толщина металлических дисков недостаточна, скорость охлаждения должна быть еще меньше.

Из приведенного примера видно, что при групповой многослойной укладке заготовок должна применяться скорость ответственного охлаждения в несколько раз меньше указанной в 4-м столбце табл. 15.

Применяемые в промышленности при отжиге крупных заготовок скорости ответственного охлаждения в 5—10 раз меньше, чем h'_u (см. табл. 15): от 0,05 до $1,0^\circ \text{C/ч}$.

Из сопоставления значений скорости h (из табл. 14) и h'_u (из табл. 15) с учетом сказанного выше следует, что скорость ответственного охлаждения заготовок определяется неоднородностями второго рода, зависящими от краевых напряжений, а не структурными неоднородностями. Преобладающая роль неоднородности второго рода тем больше, чем больше диаметр заготовки.

Из сказанного выше следует, что если путем применения защитного кольца, утолщения металлических дисков и увеличения воздушных промежутков между комплектами уменьшить перепад температуры по радиусу дисков, то можно значительно увеличить скорость ответственного охлаждения и сократить длительность 3-го этапа, составляющего больше половины цикла отжига.

Для расчета скорости охлаждения h заготовок среднего и мелкого размера Е. Д. Данишевским разработана эмпирическая зависимость ее от размеров заготовки, свойств стекла и категории оптической однородности. Она разработана на основе статистической обработки результатов контроля однородности заготовок, отжигавшихся в печах среднего качества при укладке средней «плотности». Эту зависимость обычно представляют в виде

Таблица 16

| Категории оптической однородности | Обобщенный размер L при режиме охлаждения | | | | | |
|-----------------------------------|---|-----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 123 | 49 | 24 | 15 | 12 | 6 |
| 2 | 174 | 69 | 34 | 22 | 17 | 8 |
| 3 | 213 | 85 | 42 | 26 | 21 | 10 |
| 4 | 246 | 98 | 49 | 30 | 24 | 12 |
| 5 | 275 | 110 | 55 | 34 | 27 | 13 |

таблицы (табл. 16) или номограммы (рис. 34), в которых размеры заготовки характеризуются ее обобщенным размером L

$$L = \sqrt{Dl}, \quad (43)$$

где D — диаметр светового пучка;
 l — длина его пути в стекле.

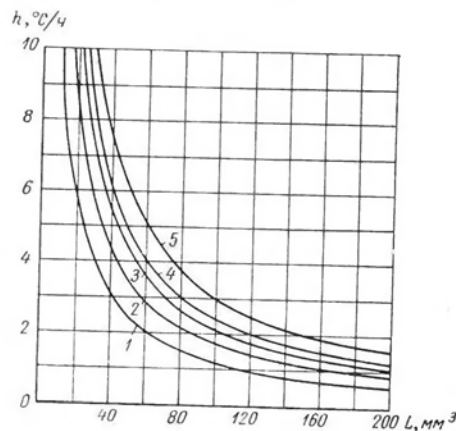


Рис. 34. Зависимость скорости ответственного охлаждения h заготовки от ее обобщенного размера L и категории однородности I —5

Для заготовок в виде дисков D — диаметр, а l — толщина, для линз D — также диаметр, а l — наибольшая толщина линзы, наконец, для призмных заготовок D — толщина призмы, а l — общая длина пути в ней.

По номограмме рис. 34 скорость ответственного охлаждения находят следующим путем: на оси абсцисс отыскивают обобщенный размер заготовки. Из найденной точки восстанавливают перпендикуляр до пересечения с кривой, соответствующей заданной категории. Ордината этой точки и будет искомой скоростью охлаждения.

В производственных условиях при большом разнообразии отжигаемых заготовок по размерам, техническим условиям и маркам стекла, при часто встречающейся

необходимости совместной загрузки в печь отжига нескольких небольших партий различных заготовок, а также при программном, автоматическом регулировании температуры печи очень трудно проводить ответственное охлаждение каждой отдельной партии со своей расчетной скоростью. Разработано небольшое количество типовых, нормальных режимов охлаждения, рассчитанных на удовлетворение требований всех существующих категорий однородности и двойного лучепреломления в применении к выпускаемым промышленностью заготовкам различных размеров. Поэтому на практике обычно пользуются небольшим числом типовых режимов охлаждения.

Вместо того чтобы в каждом отдельном случае рассчитывать режим ответственного охлаждения, пользуются таблицами, позволяющими легко найти требуемый режим по заданной категории оптической однородности или двойного лучепреломления и характеристическому размеру заготовки.

Наиболее распространены типовые режимы, приведенные в табл. 17. Первые четыре из них применяются, в основном, для крупных заготовок, а остальные шесть — для заготовок среднего и мелкого размеров.

Скорость охлаждения в зависимости от требуемой однородности партии по показателю преломления. Однородность партии заготовок по показателю преломления характеризуется его наибольшей разностью в заготовках. Наибольшая разность показателя преломления есть ничто иное, как структурная неоднородность и отличается от неоднородности 1-го рода в стекле только размером допуска. Структурная неоднородность в стекле ограничивается несколькими единицами 6-го или 1—2 единицами 5-го десятичного знака, в то время как допустимая разность

Таблица 17

| Обозначение режима ответственного охлаждения | Скорость охлаждения в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ |
|--|---|
| 01 | 0,05 |
| 02 | 0,1 |
| 03 | 0,2 |
| 04 | 0,5 |
| 1 | 1,0 |
| 2 | 2,5 |
| 3 | 5 |
| 4 | 8 |
| 5 | 10 |
| 6 | 20 |

показателя преломления Δn в партии заготовок должна быть по классу А не более $0,5 \cdot 10^{-4}$ и по классу Б — не более $1 \cdot 10^{-4}$. Поэтому для определения скорости ответственного охлаждения в зависимости от класса однородности по показателю преломления следует воспользоваться условиями и уравнениями, примененными при аналогичном расчете исходя из структурной однородности (стр. 100).

Подсчет допустимого различия скоростей охлаждения на поверхности h_n и в центре h_c массы стекла показывает, что при допуске $\Delta n = 0,5 \cdot 10^{-4}$ отношение

Таблица 18

| Диаметр печи D в мм | Скорость ответственного охлаждения в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ при классе однородности партии | |
|--------------------------|--|-----|
| | А | Б |
| 1000 | 0,9 | 1,1 |
| 800 | 1,2 | 1,4 |
| 600 | 1,9 | 2,2 |
| 400 | 3,5 | 4,1 |

h_n/h_c может быть равно 0,86, а при $\Delta n = 1 \cdot 10^{-4}$ — 0,74. Этим отношениям отвечают пониженные значения А (вместо 1200, которое берет Данюшевский): соответственно 1030 и 880, или повышенные значения числового предела в правой части выражения (41), а именно 4,3 и 4,7. Понижение значения А или повышение числа в правой части выражения (41)

означает, что можно расширить переходный период в сторону более низких температур. Следовательно, можно увеличить скорость охлаждения печи по сравнению со скоростями, указанными в табл. 14: для класса А — в $\frac{1}{0,86} = 1,16$, а для класса Б — в $\frac{1}{0,74} = 1,36$ раза.

Рассчитанные с помощью этих коэффициентов скорости охлаждения приведены в табл. 18.

Скорость охлаждения, при которой стекло отвечает классу А или Б однородности партии по показателю преломления, сильно зависит от размера печи; как видно из табл. 18, при увеличении диаметра печи от 400 до 600 мм допустимая скорость охлаждения уменьшается почти вдвое, а при увеличении его до 1000 мм — почти в 4 раза.

Скорости охлаждения в табл. 18 рассчитаны для среднего стекла. У стекол разного состава в зависимости от их температурного коэффициента вязкости интервал температур, отвечающий одинаковому интервалу вязкостей,

может быть в 1,5 раза больше или меньше, чем у среднего стекла. Соответственно этому должна применяться скорость охлаждения больше или меньше средней.

Обычно для получения класса А однородности партии заготовок по показателю преломления применяют скорость охлаждения $2,5\text{—}5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$, а для класса Б — $5\text{—}10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

Однако и эти скорости не всегда обеспечивают положительный результат.

Для получения хорошей однородности партии заготовок по показателю преломления не следует применять очень плотную укладку. Толстые металлические прокладки между коробками уменьшают перепад температуры в стекле и позволяют применить большую скорость охлаждения.

Если более сильным средством является повышение температуры выдержки, так как при этом выравнивание скорости охлаждения центра массы стекла и ее поверхности заканчивается также при более высокой температуре, при которой структурные преобразования протекают очень быстро. Как видно из табл. 13, можно без ущерба для однородности партии по показателю преломления сильно увеличивать скорость охлаждения.

Скорость охлаждения в зависимости от требований к остаточным напряжениям. Характер распределения остаточных напряжений зависит от формы заготовки. В заготовках в виде диска напряжения расположены в плоскостях, параллельных большим поверхностям.

О величине остаточных напряжений судят по двойному лучепреломлению, которое они вызывают и которое измеряется в направлении диаметра диска в середине его толщины. Так же оно измеряется и в заготовках в виде линз. Согласно формуле (12), двойное лучепреломление находится в прямой зависимости от скорости охлаждения h и квадрата полутолщины b диска.

Напомним, что коэффициент $B\theta/6$ зависит от состава стекла и для разных его марок может весьма сильно различаться (табл. 3). Так например, $B\theta/6$ (для расчета остаточных напряжений) у стекла ЛКЗ в $3\frac{1}{2}$ раза больше, чем у ТФ5.

Из выражения (12) следует, что скорость охлаждения диска h равна

$$h = \frac{6\delta\eta_0}{B\theta^2} \quad (44)$$

Расчет скорости охлаждения в зависимости от размера заготовки и допуска на двойное лучепреломление можно упростить и облегчить, если воспользоваться графическим методом. Придавая различные значения полутолщине заготовки b и допуску Δn по двойному лучепреломлению, можно получить по формуле (44) соответствующие значения скорости охлаждения h в $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Нанеся эти зна-

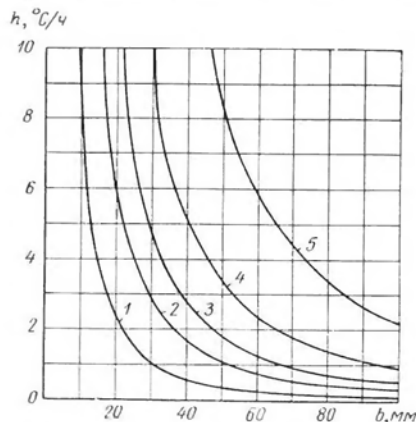


Рис. 35. Зависимость скорости ответственного охлаждения h заготовки от ее полутолщины b и категории по двойному лучепреломлению $\gamma-5$

чения на график, можно получить номограмму, представляющую семейство равноугольных гипербол (рис. 35). С помощью номограммы можно находить нужные значения h , если известны b и Δn . По оси абсцисс откладывают значение полутолщины b отжигаемой заготовки и находят соответствующую ему ординату h на линии, отвечающей заданной категории двойного лучепреломления. Эта ордината и будет искомой скоростью охлаждения.

При выборе скорости ответственного охлаждения для заготовок призм характеристическим размером является наименьший размер призмы — ее толщина. Необходимо также учитывать при этом характер укладки. При плотной укладке характеристическим размером будет расстояние между свободными (не соприкасающимися) поверхностями.

Режимы ответственного охлаждения партии заготовок, рассчитанные исходя из требований к оптической однородности, к однородности партии по показателю преломления и к двойному лучепреломлению, могут сильно различаться. В этом случае выбирается наиболее строгий из них — режим с наименьшей скоростью охлаждения.

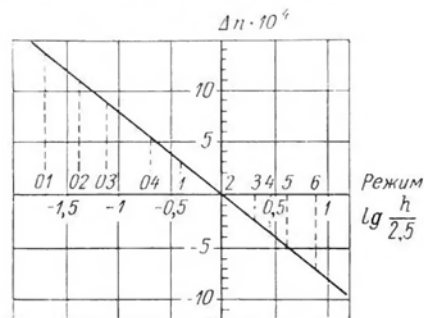


Рис. 36. График для определения «отжигового числа»

Скорость охлаждения стекла в зависимости от требуемой категории показателя преломления. Выше (стр. 32) было сказано, что показатель преломления охлажденного стекла n_k зависит от скорости его охлаждения h . Эта зависимость выражается формулой (18') $n_k = -m \lg h + u$.

Разность показателя преломления Δn , возникающую при последовательном охлаждении одного и того же стекла со скоростью h_1 и h_2 , можно найти из формулы (19) $\Delta n = n_2 - n_1 = -m \lg \frac{h_2}{h_1}$. Зависимость (19) можно изобразить графически. Для этого в качестве исходного берется значение n стекла, охлажденного со скоростью $2,5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$, к которому обычно приводится показатель преломления сырьевого стекла. Графическое изображение уравнения (19) в координатах $(\lg \frac{h}{2,5}, \Delta n)$ показано на рис. 36.

Индексами 01, 02, 1, 2 и т. д. на рисунке обозначены значения $\lg \frac{h}{2,5}$, соответствующие типовым режимам

охлаждения (см. табл. 16). С помощью графика или составленной по нему таблицы «отжиговых чисел» определяют, на сколько единиц четвертого десятичного знака изменится при отжиге показатель преломления стекла данной варки и будет ли он отвечать требованиям технических условий на оптические постоянные определенных заготовок.

Значение показателя преломления, которое будет получено после отжига, составит $n = n_0 + \Delta n$, где n_0 — паспортное значение показателя преломления, а Δn — его приращение — отжиговое число.

Величина Δn может быть как положительной, так и отрицательной, в зависимости от того, будет ли скорость h , соответствующая n , меньше или больше $2,5^\circ \text{C/ч}$.

Отжиговые числа различны для стекла разных марок, поскольку коэффициент m у них неодинаков. Отжиговые числа и значения m некоторых типовых стекол приведены в табл. 19.

В тех случаях, когда расчет ожидаемого показателя преломления дает значение, не удовлетворяющее требованиям технических условий, может быть выбран другой режим охлаждения, который изменит показатель преломления требуемым образом. Новый режим охлаждения выбирается с обязательным учетом того, чтобы он не ухудшил других качественных показателей заготовок. Так например, если ожидаемый по расчету показатель преломления при режиме охлаждения, отвечающем техническим условиям по однородности и двойному лучепреломлению, окажется ниже допустимого, согласно требуемой категории, то можно применить режим с меньшей скоростью ответственного охлаждения (предшествующий или еще выше по табл. 18). Такое изменение окажет только благоприятное действие на качество заготовок по оптической однородности, двойному лучепреломлению и на однородность партии по показателю преломления: качество стекла должно стать только выше.

Труднее корректировать режим охлаждения, когда нужно, чтобы показатель был ниже, чем ожидаемый при выбранном режиме, так как это требует применения более быстрого охлаждения, приводящего к ухудшению качества по однородности и двойному лучепреломлению. Отрицательное влияние быстрого охлаждения на однородность можно компенсировать повышением темпера-

| Марка стекла | Удельный коэффициент $m \cdot 10^4$ | Отжиговые числа $\Delta n \cdot 10^4$ (относительно режима $2,5^\circ \text{C/ч}$) при режимах ответственного охлаждения в $^\circ \text{C/ч}$ | | | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|---|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|
| | | 0,2 | 0,5 | 1 | 2,5 | 5 | 8 | 10 | 20 |
| ЛКЗ | 8,5 | +10 | +7 | +3 | 0 | -2 | -4 | -5 | -7 |
| К8 | 9,8 | +10 | +7 | +3 | 0 | -3 | -4 | -5 | -8 |
| БК10 | 9,4 | +10 | +7 | +4 | 0 | -3 | -4 | -5 | -8 |
| ТК2 | 8,5 | +9 | +6 | +3 | 0 | -2 | -4 | -5 | -8 |
| ТК14 | 12,5 | +14 | +9 | +5 | 0 | -4 | -6 | -8 | -11 |
| СТК9 | 16,0 | +17 | +12 | +6 | 0 | -5 | -8 | -10 | -15 |
| КФ6 | 4,0 | +4 | +3 | +1 | 0 | -1 | -2 | -2 | -4 |
| БФ16 | 9,5 | +10 | +7 | +4 | 0 | -3 | -5 | -6 | -9 |
| ЛФ5 | 3,7 | +4 | +3 | +1 | 0 | -1 | -2 | -2 | -4 |
| Ф1 | 6,3 | +5 | +4 | +2 | 0 | -1 | -2 | -3 | -4 |
| Ф9 | 20,0 | +22 | +15 | +8 | 0 | -6 | -10 | -12 | -18 |
| ТФ1 | 5,5 | +6 | +4 | +2 | 0 | -2 | -2 | -3 | -5 |
| ТФ5 | 5,5 | +6 | +5 | +2 | 0 | -2 | -3 | -3 | -5 |
| ТФ11 | 22,5 | +24 | +16 | +9 | 0 | -7 | -11 | -14 | -21 |
| ОФ1 | 4,5 | +6 | +5 | +2 | 0 | -2 | -3 | -3 | -5 |
| ОФ3 | 23,0 | +25 | +16 | +9 | 0 | -7 | -11 | -14 | -21 |

туры выдержки и применением более толстых металлических прокладок. Однако остаточные напряжения при повышении температуры выдержки увеличатся.

Если требования к качеству стекла по оптической однородности и однородности партии по показателю преломления невысокие или совсем отсутствуют, корректирование режима охлаждения в сторону увеличения его скорости можно производить значительно свободнее, но при этом во избежание роста остаточных напряжений следует понизить на $10-15^\circ$ температуру выдержки.

28. Температурная граница между ответственным и неответственным охлаждением

Как уже было сказано, стекло не имеет определенной, четко выраженной нижней границы области отжига и практически такой границей можно считать температуру t_n , отвечающую вязкости $\eta = 10^{18.5}$. Эта температура была найдена для ряда стекол методом экстраполяции, исходя из экспериментальных данных об их вязкости от 10^9 до 10^{13} пз. В табл. 20 приведена нижняя температура отжига для некоторых стекол. Там же указана разность $t_n - t_{n'}$, выражающая температурный интервал области отжига.

Таблица 20

| Марка стекла | t_n | $t_n - t_{n'}$ | Марка стекла | t_n | $t_n - t_{n'}$ |
|--------------|-------|----------------|--------------|-------|----------------|
| ЛК6 | 250 | 140 | БФ8 | 410 | 110 |
| КЗ | 410 | 150 | БФ12 | 350 | 110 |
| К8 | 415 | 145 | Ф1 | 330 | 130 |
| БК6 | 430 | 130 | Ф2 | 325 | 135 |
| БК10 | 460 | 110 | ТФ3 | 310 | 110 |
| ТК2 | 505 | 115 | ТФ5 | 320 | 100 |
| ТК16 | 565 | 85 | ТФ7 | 285 | 115 |
| СТК9 | 565 | 65 | ОФ2 | 330 | 150 |

Ответственное охлаждение производится до нижней температуры отжига. С этой температуры начинается следующий заключительный этап отжига.

При отжиге заготовок с нежесткими техническими условиями этап ответственного охлаждения может быть закончен при более высокой температуре. Это объясняется следующим. При повышении скорости охлаждения, вследствие увеличения перепада температуры, в стекле возникают временные напряжения. Если стекло обладает хотя бы незначительной подвижностью частиц, если вязкость его не слишком велика, происходит частичная релаксация этих напряжений, которая приводит к увеличению остаточных напряжений. Могут происходить также небольшие структурные изменения показателя преломления стекла, неодинаковые в разных его точках, которые

приведут к образованию небольших неоднородностей первого рода. Если допуски по однородности и двойному лучепреломлению достаточно велики, то небольшие ухудшения качества, возникающие при изменении скорости охлаждения, не повлекут за собой превышения допустимых значений. При отжиге заготовок малого размера и невысокого качества по оптической однородности температура окончания ответственного охлаждения и перехода к неответственному может быть повышена на $30-60^\circ$, т. е. температурный интервал ответственного охлаждения может быть сокращен примерно на $35-40\%$.

Для заготовок среднего размера и невысокого качества температурный интервал ответственного охлаждения может быть сокращен только на $20-30^\circ$. При отжиге крупных и очень крупных заготовок высокого качества по оптической однородности полезно даже удлинить интервал равномерного охлаждения на $30-50^\circ$ или ввести между ответственным и неответственным охлаждением переходный, примерно 50 -градусный, интервал с промежуточной скоростью охлаждения. Этим может быть предотвращено резкое увеличение перепада температуры и образование вследствие этого больших временных напряжений, некоторая часть которых могла бы релаксировать и этим увеличить остаточные напряжения.

29. Неответственное охлаждение

Основной задачей данного этапа является возможно более быстрое охлаждение стекла до «комнатной» температуры при сохранении целостности заготовок. В этом отношении задача неответственного охлаждения сходна с той, которая ставится при нагревании стекла (на первом этапе отжига).

Выше уже было сказано, что при переходе от ответственного охлаждения к неответственному в стекле появляются временные напряжения, как результат более быстрого охлаждения, вызывающего увеличение перепадов температуры между серединой и поверхностями заготовок. При охлаждении стекла в середине образуются напряжения сжатия, а на поверхностях — напряжения растяжения. Напряжения растяжения на поверхности опаснее, чем внутри заготовки, поскольку ее поверхность всегда имеет какие-либо дефекты: трещинки, заколы,

включения, вокруг которых концентрируются местные напряжения и которые могут явиться началом образования трещины. Поэтому охлаждение следует всегда производить осторожнее, чем нагревание.

При расчете скорости охлаждения не нужно вводить никаких поправок на остаточные напряжения, как при нагревании. Обычно рекомендуется вычислять допустимую скорость охлаждения плоских заготовок по формуле для пластины с изотермической поверхностью:

$$h = \frac{10}{b^2} \text{ } ^\circ\text{C/мин} = \frac{600}{b^2} \text{ } ^\circ\text{C/ч.} \quad (45a)$$

В этой формуле в коэффициенте 10 (600) уже предусмотрен шести-семикратный «запас прочности», получаемый по формуле (4a), если вместо P поставить значение в 6—7 раз меньше прочности стекла на разрыв. Для заготовок мелкого и среднего размеров формула (45a) дает практически неосуществимые скорости охлаждения. Например, при толщине заготовки $2b = 5$, по расчету $h \approx 100^\circ\text{C/ч}$, в то время, как реальная скорость инерционного охлаждения печи отжига от температуры 300—400° и ниже не превышает 15—20° C/ч. Даже при многослойной укладке заготовок диаметром до 150 мм такая скорость охлаждения не вызовет опасных краевых напряжений, которые могли бы привести к растрескиванию стекла.

Иначе обстоит дело с крупными заготовками. Вследствие их большого радиуса при многослойной укладке краевые напряжения в них (особенно в средних по стопке) могут оказаться столь значительными, что вызовут образование радиальных трещин. В этом случае допустимую скорость охлаждения следует рассчитывать по формуле для цилиндра:

$$h = \frac{600}{R^2} \text{ } ^\circ\text{C/ч,} \quad (45б)$$

где R — радиус заготовки в см. Эта скорость в $3 \frac{b^2}{R^2}$ раз меньше скорости охлаждения, вычисленной по формуле (45a).

На рис. 37 графически изображена зависимость скорости охлаждения от полутолщины b заготовки или радиуса R стопки заготовок. Из графика видно, что, например, при диаметре заготовки 400 мм ($R = 20$ см) скорость охлаждения не должна превышать $1,5^\circ\text{C/ч}$.

Применение теплоизоляции боковой поверхности стопки, уменьшая перепад температуры по радиусу, позволяет проводить охлаждение с большей скоростью.

В стеклах разных марок, обладающих различными прочностными характеристиками, трещины возникают под действием неодинаковых напряжений. Однако разница между ними не очень велика и вполне компенсируется коэффициентом запаса, содержащимся в формулах (45a) и (45б).

Для проведения серийных отжигов заготовок на практике обычно устанавливаются типовые режимы неотвественного охлаждения. Эти режимы (их пять) предусматривают для наиболее крупных заготовок (диаметром более 400 мм) предельную скорость охлаждения 5°C/ч . Для менее крупных допускаются скорости охлаждения 10 и 15°C/ч , а для средних и мелких — 25 и 50°C/ч .

В связи с тем, что охлаждение печи на последнем этапе происходит инерционно с постепенным замедлением, время

Таблица 21

| Толщина в мм | Диаметр или сторона в мм | | | |
|-------------------|--------------------------|--------|---------|-----------|
| | до 50 | 50—100 | 100—150 | Более 150 |
| К, БК, ТК, ЛФ, БФ | | | | |
| До 10 | 300 | 200 | 150 | — |
| 10—40 | 200 | 150 | 120 | 60 |
| Более 40 | 150 | 120 | 100 | 40 |
| Ф, ТФ, ОФ | | | | |
| До 10 | 250 | 150 | 120 | — |
| 10—40 | 150 | 120 | 100 | 50 |
| Более 40 | 120 | 100 | 90 | 30 |

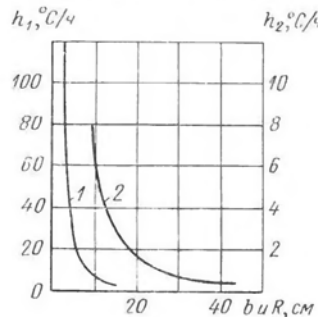


Рис. 37. Зависимость скорости неотвественного охлаждения h пластинки 1 от ее полутолщины b и цилиндра 2 от его радиуса R

полного охлаждения заготовок значительно затягивается, удлиняя цикл отжига. Поэтому при отжиге заготовок мелкого и среднего размера обычно принимают меры, способствующие ускорению охлаждения стекла. Для этой цели либо постепенно приподнимают крышку или колпак печи, чтобы путем конвекционного теплообмена с внешним воздухом ускорить охлаждение заготовок, либо вынимают целиком из печи контейнер с коробками или заготовками. Извлечение заготовок из печи производится при такой температуре, чтобы скорость охлаждения заготовок на воздухе не превышала предельно допустимой. Эта температура зависит от размеров заготовок и термостойкости стекла.

Безопасная температура открывания печи отжига в зависимости от размеров заготовки и типа стекла приведена в табл. 21. Эта температура установлена экспериментально и проверена практикой.

30. Инерционный отжиг

Инерционный отжиг отличается от линейного характером ответственного охлаждения. Если в линейном отжиге изменение температуры в зависимости от времени выражается прямой линией, то в инерционном понижении температуры следует экспоненциальной зависимости от времени.

Отжиг этого типа был предложен А. И. Стожаровым в 40-х гг.

Линейный отжиг имеет некоторые недостатки. Равномерное охлаждение, не являясь естественным процессом, создается принудительно, с помощью программного регулирования. Для его осуществления требуется специальная аппаратура (программные регуляторы, исполнительная аппаратура для регулирования напряжения или силы тока) и необходима затрата электрической энергии. Длительность ответственного охлаждения в зависимости от режима составляет от 10 до 1500 ч и более. В процессе этого охлаждения не должно быть перерывов или значительных отклонений от заданной скорости снижения температуры. Поэтому всякие длительные перерывы в электроснабжении, выход из строя элементов терморегулирующей аппаратуры, вызывающие существенные срывы режима, приводят к необходимости повторения этапа ответственного охлаждения сначала.

Инерционное охлаждение свободно от всех перечисленных недостатков. Скорость его определяется только тепловой инерцией загруженной печи, а последняя подбирается с таким расчетом, чтобы скорость охлаждения не превышала скорости определенного режима. Поэтому для проведения инерционного охлаждения не нужна затрата электроэнергии и не требуется аппаратура для программного регулирования. Режим инерционного отжига не подвержен срывам.

В то же время инерционный отжиг имеет и свой существенный недостаток — отсутствие маневренности. В печи, рассчитанной на какой-либо определенный режим, не может быть осуществлено инерционное охлаждение ни по какому другому режиму.

Как уже было ранее указано, в инерционном охлаждении температура подчиняется экспоненциальной зависимости от времени:

$$t = Qe^{-q\tau}, \quad (46)$$

где t — температура в момент τ ;
 τ — время от начала инерционного охлаждения;
 Q и q — постоянные, зависящие от тепловых характеристик печи и загруженного в нее стекла.

Скорость инерционного охлаждения выражается формулой

$$h = -\frac{dt}{d\tau} = Qqe^{-q\tau}.$$

Эта формула также является экспоненциальной функцией от времени. Подставляя в последнее выражение, согласно формуле (46), вместо $Qe^{-q\tau}$ температуру t , получим

$$h = qt. \quad (47)$$

Таким образом, скорость инерционного охлаждения находится в линейной зависимости от температуры.

Из зависимости (47) следует:

а) скорость охлаждения в начале инерционного снижения температуры больше, чем в конце;

б) при отжиге в одной и той же печи стекол с различной температурой отжига скорость их ответственного охлаждения будет неодинаковой (для упрощения принимаем, что коэффициент температуропроводности у стекол одинаков);

в) поскольку на значение коэффициента q влияет температуропроводность загруженного в печь стекла, то при отжиге разных стекол, обладающих одинаковой практической температурой отжига, но разными коэффициентами температуропроводности, скорость их инерционного охлаждения будет несколько различаться. Однако это различие много меньше, чем в случае разных температур отжига.

Определим, насколько изменяется скорость охлаждения в зависимости от температуры. Пусть температурам t_1 и t_2 соответствуют согласно (47) скорости охлаждения h_1 и h_2 .

Тогда

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{t_1}{t_2}.$$

Найдем изменение скорости на протяжении инерционного ответственного охлаждения. Если скорость охлаждения в начале инерционного охлаждения $h_1 = 2,5^\circ \text{C}/\text{ч}$, а температура выдержки $t_1 = 560^\circ \text{C}$ и если ответственное охлаждение производится в температурном интервале 100° , то скорость в конце интервала

$$h_2 = h_1 \frac{t_2}{t_1} = 2,5 \frac{460}{560} = 2,1^\circ \text{C}/\text{ч}.$$

Пусть инерционному отжигу в одной и той же или в одинаковых инерционных печах подвергаются стекла типов тяжелый крон (ТК), крон (К) и флинт (Ф) с температурами отжига, соответственно, 650 , 560 и 450°C . Примем для упрощения, что температуропроводность стекол одинакова. Пусть у крона при охлаждении от 560° начальная скорость охлаждения $h_k = 2,5^\circ \text{C}/\text{ч}$ (режим 2 в табл. 17). Тогда для стекла ТК начальная скорость охлаждения составит

$$h_{mk} = 2,5 \frac{650}{560} \approx 2,9^\circ \text{C}/\text{ч},$$

а для флинта

$$h_f = 2,5 \frac{450}{560} \approx 2^\circ \text{C}/\text{ч}.$$

И та, и другая скорость h_{mk} и h_f не соответствуют режиму 2.

Значение коэффициента q , характеризующее инерционность печи с загрузкой, может быть легко вычислено из уравнения (47), если задаться определенными значениями t и h . Пусть печь при отжиге кронов дает начальную скорость охлаждения, соответствующую режиму 2, т. е. при $t_n = 560^\circ \text{C}$ $h = 2,5^\circ \text{C}/\text{ч}$, тогда $q = \frac{2,5}{560} = 0,045$.

Зная величину q можно вычислить h для любого значения t .

Ввиду того, что иметь отдельную печь для каждой температуры отжига практически невозможно, обычно инерционные печи рассчитываются на определенный нормальный режим охлаждения для среднего значения t_n . Для остальных же стекол с более высокой или более низкой практической температурой отжига фактический режим охлаждения только приближенно соответствует нормальному.

Постепенное уменьшение скорости охлаждения с понижением температуры не ухудшает, а скорее даже улучшает качество стекла по оптической однородности, однородности партии по показателю преломления, и двойному лучепреломлению.

Е. Э. Данюшевский разработал теорию влияния инерционного отжига на однородность стекла¹.

При инерционном отжиге заготовки загружают в специальный закрытый контейнер, который затем помещают в печь. Когда заканчивается этап ответственного охлаждения, его извлекают из печи и оставляют остывать на воздухе. Контейнер представляет собой цилиндрический стакан со стенками из теплоизоляционного материала, замедляющими охлаждение находящегося в нем стекла. Толщина теплоизоляции рассчитана таким образом, чтобы скорость инерционного охлаждения контейнера со стеклом не превышала допустимого для заготовок среднего размера.

Таким путем достигается сокращение цикла отжига и повышение коэффициента использования инерционной печи. При этом получается также дополнительная экономия электроэнергии от использования тепла не остывшей печи для начального нагрева следующего контейнера с заготовками, помещаемого на место вынутого.

¹ Эта работа не опубликована; она включена в технический отчет, составленный в 1956 г.

Инерционный отжиг широко применяется в оптической промышленности и вполне себя оправдывает при отжиге заготовок мелкого и среднего размеров с высокими техническими условиями по оптической однородности, двойному лучепреломлению и однородности партии заготовок по показателю преломления. В большинстве случаев инерционные печи рассчитаны на режим 2.

Для заготовок крупного размера инерционный отжиг не применяется, так как при режимах охлаждения, применяемых для заготовок этого размера, сильно удлинился бы цикл отжига и значительно увеличились бы габариты печи вследствие существенного утолщения теплоизоляционного слоя; габариты эти достаточно велики уже в инерционных печах для режима 2.

31. Ускоренный отжиг

Отжиг ускоренного типа дает возможность получить в стекле такое же остаточное двойное лучепреломление, как и при линейном отжиге, но в значительно более короткий срок. Этот тип отжига был разработан в 1920 г. Адамсом и Вильямсоном [26] вместо применявшегося в то время линейного отжига без выдержки.

В ускоренном отжиге используется быстрое уменьшение скорости релаксации напряжений в стекле с понижением его температуры, как это видно из формулы (14).

Если понизить температуру выдержки, то нужно увеличить ее длительность вследствие уменьшения скорости релаксации; вместе с тем это позволяет проводить охлаждение со значительно большей скоростью, чем при более высокой температуре выдержки. Первое изменение ведет к удлинению процесса отжига, а второе — к его сокращению. Адамс и Вильямсон построили свой режим отжига следующим образом.

1. Температура выдержки стекла понижается на несколько десятков градусов, а длительность ее увеличивается настолько, чтобы произошла релаксация только части имеющихся в нем напряжений, например, половины напряжений, допустимых по техническим условиям δn_d . Оставшаяся часть $\delta n'$ также равна половине δn_d .

2. Охлаждение стекла в области отжига производится с постепенным увеличением скорости. При этом в начале

охлаждения образуется перепад температуры, который будет увеличиваться при каждом изменении скорости охлаждения. Возникновение перепада температуры и последующее его увеличение вызовут образование напряжений, часть из которых релаксирует и появится впоследствии в виде остаточных $\delta n''$. Поэтому скорость охлаждения рассчитывается так, чтобы эти остаточные напряжения составили как раз разницу между допустимыми и оставленными на выдержке $\delta n'' = \delta n_d - \delta n'$.

Расчет режима ведется следующим путем.

1. Температуру выдержки $t_{вмд}$ находят по формуле (13), исходя из значения константы отжига A_0 , которая должна удовлетворять условию

$$A_0 = \frac{0,047}{p}, \quad (48)$$

где $p = \frac{\theta}{6} B b^2$, а θ , согласно (5) равно $\frac{\alpha E}{a(1-\mu)}$;

B — коэффициент Брюстера в $\text{нм} \cdot \text{см} / \text{КГ}$;

b — полутолщина стеклянной пластинки в см .

(Для стекла, обладающего средними свойствами, авторы ускоренного режима принимают величину $\frac{\theta}{6}$ равной 4,6

и $B = 2,8$; при толщине пластинки равной 2 см , $b = 1 \text{ см}$ и $\theta \approx 13$). Из формулы (48) следует, что чем больше толщина пластинки, тем меньше значение A_0 и тем, следовательно, при более низкой температуре нужно производить выдержку. Зависимость величины понижения температуры выдержки $\Delta t = t_v - t_{вмд}$ от толщины пластинки $2b$ для стекла разных типов по данным Адамса и Вильямсона показана на рис. 38.

2. Продолжительность выдержки $\tau_{вмд}$ должна быть равна длительности охлаждения в области отжига

$$\tau_{вмд} = \tau_{охл} = \frac{40}{h_0}, \quad (49)$$

где h_0 — начальная скорость охлаждения.

Если в результате отжига двойное лучепреломление в пластинке не должно превышать 5 $\text{нм} / \text{см}$, то к концу выдержки оно должно составить примерно $\delta n' = 2,6 \text{ нм} / \text{см}$.

3. Начальная скорость охлаждения

$$h_0 = \frac{5,2}{p}, \quad (50)$$

где p имеет то же значение, что и в формуле (48).

Последующее увеличение скорости охлаждения по мере понижения температуры определяется зависимостью

$$h_t = \frac{h_0}{2} \left(1 + 2^{\frac{t_{\text{выд}} - t}{20}} \right). \quad (51)$$

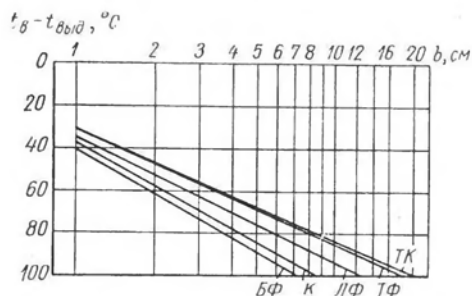


Рис. 38. Понижение выдержки стекла разных типов в зависимости от толщины заготовки $2b$

Последовательные значения скорости охлаждения при понижении температуры на каждые 20° , а также отношение каждого из значений скоростей к предыдущему даны в табл. 22.

Таблица 22

| $t_{\text{выд}} - t$ в $^\circ\text{C}$ | h_t | Отношение данной скорости к предыдущей $h_{tn} : h_t (n-1)$ |
|--|------------|--|
| 0 | h_0 | |
| 20 | $1,5 h_0$ | 1,50 |
| 40 | $2,5 h_0$ | 1,67 |
| 60 | $4,5 h_0$ | 1,80 |
| 80 | $8,5 h_0$ | 1,89 |
| 100 | $16,5 h_0$ | 1,94 |

Неответственное охлаждение в ускоренном отжиге строится так же, как и в линейном.

Ускоренный тип отжига в среднем сокращает длительность всего цикла отжига более чем вдвое. В этом можно убедиться на приведенном в табл. 23 примере поэтапного сравнения линейного (без выдержки) и ускоренного

Таблица 23

| Тип отжига | Выдержка | | Ответственное охлаждение | | Общая длительность выдержки и охлаждения t в ч |
|------------|---|-------------------------|--|-------------------------|--|
| | Температура $t_{\text{выд}}$ в $^\circ\text{C}$ | Длительность τ в ч | Начальная скорость h_0 в $^\circ\text{C}/\text{ч}$ | Длительность τ в ч | |
| Линейный | t_a | 0 | 2,8 | 10,3 | 10,3 |
| Ускоренный | $t_a - 60$ | 1,7 | 24 | 1,7 | 3,4 |

отжигов пластинок из стекла типа крона толщиной 2 см, дающих одинаковое двойное лучепреломление [26]. Расчет основных этапов ускоренного отжига для пластинок пяти разных толщин из стекла трех различных типов приведены в табл. 24.

Таблица 24

| Толщина пластинок стекла в см | Понижение Δt температуры выдержки относительно t_a в $^\circ\text{C}$ для | | | Длительность выдержки в ч | Скорость охлаждения в $^\circ\text{C}/\text{ч}$ | |
|-------------------------------|---|------------------|--------|---------------------------|---|--------------|
| | крона | баритового крона | флинта | | начальная h_0 | конечная h |
| 1 | 38 | 35 | 30 | 0,8 | 96 | 1584 |
| 2 | 59 | 54 | 46 | 3,5 | 24 | 396 |
| 5 | 86 | 79 | 67 | 21 | 3,8 | 63 |
| 10 | 107 | 98 | 82 | 86 | 1,0 | 16 |
| 20 | 128 | 117 | 98 | 336 | 0,2 | 4 |

Приводя здесь данные Адамса и Вильямсона, считаем нужным заметить, что, с нашей точки зрения, пользоваться приемом значительного (более 50°) понижения температуры выдержки не следует, так как по данным В. А. Флоринской [23] при сильном понижении температуры выдержки релаксация напряжений идет до определенного, довольно высокого предела, ниже которого этот процесс прекращается.

В ускоренном отжиге, в такой же мере как и в линейном, необходимо учитывать влияние характера укладки заготовок на остаточные напряжения. Этот тип отжига

не применим для заготовок, нормируемых по оптической однородности и однородности партии по показателю преломления: он приводит к тому, что стекло приобретает большую структурную неоднородность.

Ускоренный отжиг применим лишь для заготовок оптических деталей, работающих в отраженном или про-

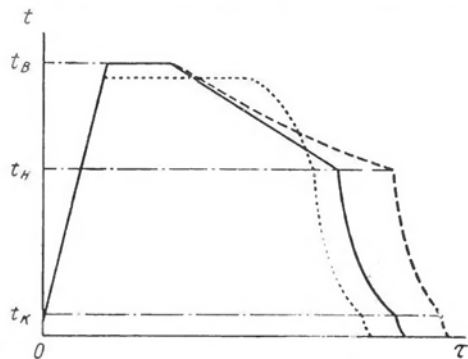


Рис. 39. Температурный режим отжига трех типов: линейного — — —; инерционного — — — и ускоренного. . . .

ходящем свеге, но с очень малым поперечным сечением пучка, например для заготовок зеркал, некоторых защитных стекол и т. п.

Сопоставление всех трех типов отжига: линейного, инерционного и ускоренного — представлено на рис. 39. Все они имеют общий режим нагревания, общий температурный интервал ответственного охлаждения, очень близкий характер неответственного охлаждения и общую температуру открывания печи и выгрузки стекла. Рисунок четко показывает суть различия между основными этапами этих типов отжига.

ГЛАВА V ПЕЧИ ТОНКОГО ОТЖИГА

32. Основные требования к печам тонкого отжига и принципы их устройства

Жесткие требования, предъявляемые к точности и тщательности выполнения ответственных этапов режима отжига, обусловили определенные технические условия, которым должны отвечать печи отжига.

Главные требования, предъявляемые к рабочей камере печи, таковы: 1) отсутствие перепадов температуры во время выполнения ответственных этапов отжига: температурной выдержки и ответственного охлаждения; 2) постоянство температуры во время выдержки; 3) сохранение заданной скорости охлаждения в период ответственного снижения температуры.

Прежде чем говорить о средствах осуществления перечисленных требований, рассмотрим в общих чертах устройство печи отжига. Принципиальная схема печи показана на рис. 40.

Обычно печь отжига состоит из рабочей камеры, которая ограничивается металлическим стаканом 1 и закрывающей его металлической же крышкой 2. Вдоль стенок, дна и крышки стакана с внешней их поверхности расположены секции нагревателя 3; в качестве материала для нагревателя применяются сплавы с высоким удельным сопротивлением: нихром (ЭИ-292), сплав № 2 (ЭИ-340) и сплавы ЭИ-595 и ЭИ-626. Нагреватель отделен от металла слоем электронизоляции. Стакан с нагревателями со всех сторон изолирован от окружающего пространства слоем теплоизоляции 4. Этот слой заключен в кожух из листового железа 5. В верхней или в нижней части теплоизоляционного слоя делается разъем 6; в первом случае печь имеет съемную крышку, а во втором — съемный

колпак. Для крепления к подъемному механизму поднимающаяся часть печи снабжается кольцами 7. Управление температурным ходом печи производится одним или несколькими программными регуляторами с помощью соответствующего числа ведущих термпар, горячие спай 8 которых располагаются непосредственно около нагревателей. Внутри рабочей камеры печи находятся

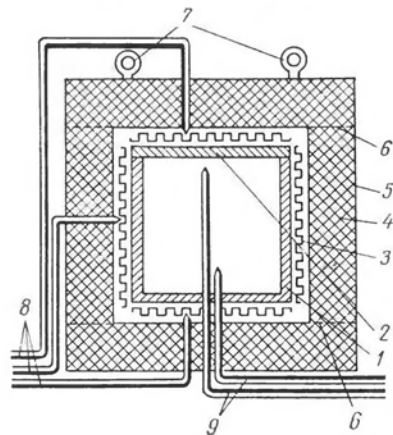


Рис. 40. Принципиальная схема печи тонкого отжига

контрольные термпары 9, по которым фиксируют фактический температурный режим отжига стекла.

В промышленных печах разных моделей элементы принципиальной конструкции различаются размерами и их соотношениями, качеством применяемых материалов и способом осуществления основных требований.

В связи с этим печи разных моделей различаются и качеством выполнения заданного режима отжига, степенью отступления от основных требований: безградиентности, стабильности температуры во время выдержки и равномерности охлаждения.

В конструктивном отношении разные модели печей отжига, применяемые в оптической промышленности, можно разделить на две группы: неразборные и разборные. В печах первой группы все конструктивные элементы:

металлический стакан, нагреватели, теплоизолирующий слой — жестко связаны между собой различными способами крепления, снимается только крышка. Такие печи представляют собой конструктивно одно целое (рис. 41).

Печи второй группы (рис. 42) состоят в основном из следующих, не связанных между собой жестким креплением, частей: 1) основания из теплоизоляционного материала с вмонтированным в него нагревательным элементом, вделанного в фундамент; 2) стального стакана с укрепленным на его наружной поверхности боковым нагревателем, установленным concentrically основанию; 3) металлической или керамической крышки с верхним нагревательным элементом (в некоторых моделях нагреватель вмонтирован в теплоизоляционный колпак).

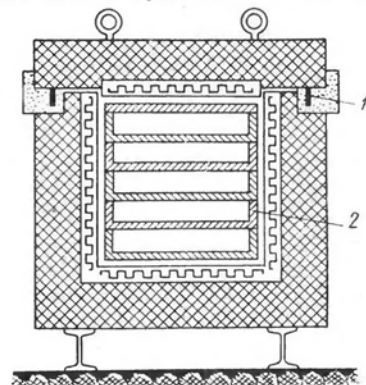


Рис. 41. Схема печи отжига со съемной крышкой:

1 — песочный затвор; 2 — укладочные приспособления

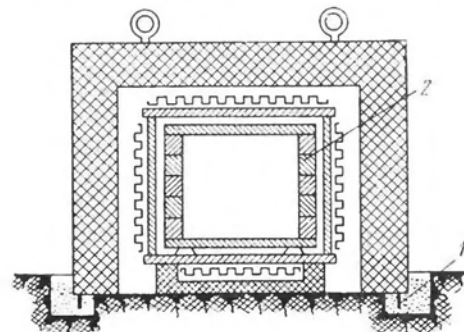


Рис. 42. Схема печи отжига со съемным колпаком:

1 — песочный затвор; 2 — укладочные приспособления

пак); 4) съемного теплоизоляционного колпака круглой или прямоугольной формы, фиксируемого при опускании и установке на место специальными направляющими.

Каждый из указанных двух конструктивных типов печей имеет свои достоинства и недостатки. Положительным качеством неразборных печей является постоянство взаимного расположения частей печи, возможность транспортировки печи на другое место целиком без разборки. В то же время ремонт таких печей сложнее и требует больших затрат времени.

Разборные печи легче доступны для ремонта, так как возможна быстрая замена дефектных узлов или частей; эти печи удобнее в загрузке их заготовками. Большим преимуществом печей разборного типа является наличие воздушных зазоров между колпаком и стаканом, способствующих выравниванию температуры вокруг стакана с помощью конвекционных потоков. В то же время в них легче нарушается правильность взаимного расположения основных частей.

И в неразборных, и в разборных печах отжига рабочая камера тщательно изолируется уплотняющими устройствами от внешнего пространства во избежание подсосов холодного воздуха через неплотности, что может исказить температурное поле рабочей камеры. Изоляция достигается с помощью песочного затвора (см. рис. 41 и 42).

33. Классификация печей тонкого отжига

Все печи отжига можно классифицировать по тепловой характеристике, по вместимости и по точности выполнения заданного режима отжига.

По тепловой характеристике печи отжига можно разделить на следующие типы: 1) малоинерционные; 2) среднеинерционные; 3) инерционные.

По вместимости они могут быть разделены на три группы: 1) печи большой емкости вместимостью 500—700 кг; 2) печи средней емкости 150—300 кг; 3) печи малой емкости 50—100 кг.

С точки зрения точности выполнения заданного режима печи можно разбить на 3 класса:

1-й — печи наиболее высокого качества, в которых перепады температуры и колебания ее на выдержке не более 5°, а отступления от заданной скорости ответственного охлаждения не превышают 5—10%;

2-й — печи среднего качества с перепадами температуры и колебаниями ее во время выдержки не более 10°, и отступлениями скорости ответственного снижения температуры не более 25%;

3-й — печи низкого качества с перепадом температуры 20°, колебаниями на выдержке 10° и временными отклонениями скорости охлаждения более 25%.

Малоинерционные печи. К этому типу относятся печи, в которых уменьшение теплоотдачи в окружающее пространство достигается, помимо слоя теплоизоляции, применением экранирования, выполненного в виде ряда слоев полированного металла, например алюминиевой фольги.

Благодаря хорошему отражению теплового излучения и небольшой массе экранирующего материала, печи такого типа потребляют малые количества тепла. Однако для точного выполнения заданного температурного режима малоинерционные печи требуют непрерывной подачи в них строго регулируемой электроэнергии, так как недостаток тепловой инерции приводит к резким изменениям температуры печи соответственно колебаниям силы тока.

Для тонкого отжига оптического стекла такие печи мало пригодны — они не всегда отвечают требованиям, даже для печей 3-го класса.

Среднеинерционные печи. Печи отжига этого типа наиболее широко распространены в оптической промышленности. Теплоемкость и инерционность печи обычно тесно связаны с группой по емкости, к которой она принадлежит: наибольшей теплоемкостью и инерционностью обладают печи большой емкости, наименьшей — печи малой емкости.

Модели печей этих типов, применяемые в промышленности, существенно различаются между собой материалом и размерами конструктивных элементов, особенно таких, которые определяют теплоемкость печи и изотермичность ее рабочей камеры. Так, например, в большей части печей этого типа (ОКБ-650, АО, РО) стакан выполнен из массивного металла; при этом, чем крупнее стакан, тем больше толщина его стенки, дна и крышки (несколько сантиметров). Теплоизоляционным материалом, образующим внешний теплозащитный слой, служит легковесный шамот, (диатомит), мятая алюминиевая фольга и др. Независимо от легкости того и другого материала, общий вес теплоизоляции с учетом толщины ее слоя достаточно велик.

Собственная теплоемкость печи, таким образом, складывается из теплоемкости металлического стакана, сделанного из нержавеющей стали или чугуна, и теплоемкости теплозащитного слоя. К этому добавляется еще теплоемкость самого загруженного в печь стекла и укладочных приспособлений. В других моделях печей этого типа стакан выполнен из тонкого листового железа (толщина несколько миллиметров). В этом случае собственной теплоемкостью печи является масса ее теплоизоляции. К ней добавляется масса загруженного стекла и металла укладочных приспособлений.

Печи данного типа могут быть любого класса. При этом качество, соответствующее 1 и 2-му классам, легче достигается в печах с массивным металлическим стаканом, так как вследствие большой теплопроводности металла сам стакан способствует выравниванию температуры по высоте рабочей камеры. Однако одного этого недостаточно. Необходимо чтобы было хорошо подобрано распределение выделяемой нагревателем энергии. Распределение ее должно отвечать неравномерности теплоотдачи разных участков поверхности печи. Такое распределение энергии можно получить расчетным путем, но так как точный учет всех факторов, влияющих на энергетический баланс, является нелегкой задачей, необходимое распределение энергии обычно достигается с помощью различных регулирующих приспособлений в процессе хода печи.

Для этого нагреватель расчленяется на отдельные секции, распределяемые по различным участкам поверхности стакана, например, по низу и верху цилиндра, или по боковой поверхности, дну и крышке. Количество электроэнергии, поступающей в разные секции, регулируется либо путем самостоятельного программного регулирования каждой секции, либо с помощью периодического перераспределения в них силы тока. Путем регулирования распределения энергии и использования металлического стакана или вкладыша с массивными стенками можно достичь такой изотермичности по высоте рабочей камеры, что перепад температуры в печи как в процессе выдержки, так и во время ответственного снижения температуры не будут превышать 5° . Большая теплоемкость этих печей, особенно большая теплоемкость металлического стакана и загруженного стекла сглаживает колебания темпера-

туры нагревателя, происходящие в процессе ее регулирования при включении и выключении тока.

Поэтому печи большой емкости второго типа легко могут быть доведены по точности работы до качества 2-го и даже 1-го класса. Печи же малой емкости этого же типа со стаканами не из массивного металла, а из листового железа и без массивного металлического вкладыша следует отнести по точности выполнения режима к 3-му классу.

Инерционные печи. Печи этого типа отличаются настолько высокой теплоемкостью, что их свободное охлаждение при выключенном токе происходит с малой скоростью согласно уравнению (46). Эта скорость обуславливается только тепловой инерцией печи с загруженным в нее стеклом и температурой печи согласно формуле $h = qt$. С понижением температуры в центре печи скорость охлаждения также уменьшается.

Тепловая инерция печи, зависящая от ее теплоемкости и теплопроводности, подбирается с таким расчетом, чтобы начальная скорость охлаждения загруженной печи соответствовала какому-либо из наиболее распространенных режимов ответственного снижения температуры, например, второму. Тепловая инерция характеризуется коэффициентом q .

Основное преимущество печей данного типа — полная независимость от внешних источников энергии и, как следствие этого, высокая стабильность режима охлаждения. Однако и для печей указанного типа остаются обязательными все те условия, обеспечивающие отсутствие перепадов и колебаний ее температуры при выдержке, которые требуются от печей первого и второго типов. Инерционные печи легко могут быть доведены до уровня требований 1-го класса.

Недостатками печей этого типа являются: непостоянство режима ответственного охлаждения стекол с разной температурой отжига и очень медленное охлаждение печи на четвертом этапе отжига.

Непостоянство режима ответственного охлаждения стекла с разной температурой отжига (п. 30) достигает 20%. Например, если для кронов значение h_k равно $2,5^{\circ}\text{C}$ (режим 2), то для тяжелых кронов с $t_n = 640^{\circ}$ оно составляет $h_{mk} = 2,9^{\circ}\text{C/ч}$, а для флинтв, имеющих $t_n = 460^{\circ}$, $h_f = 2^{\circ}\text{C/ч}$.

С точки же зрения свойств стекол этих типов желательно было бы соотношение скорости обратного характера: тжелые кроны, как стекла более короткие и обладающие большим температурным коэффициентом показателя преломления β в области отжига, должны были бы охлаждаться более медленно, чем кроны, а флинты — стекла достаточно длинные с малым температурным приростом показателя преломления — можно было бы охлаждать быстрее.

Слишком медленное охлаждение печи при температурах ниже области отжига — как раз на том этапе отжига, на котором допускается быстрое охлаждение стекла, сильно удлиняет цикл отжига. Для сокращения длительности неответственного охлаждения стекла заготовки мелкого и среднего размера (кроме самых крупных из них) по окончании третьего этапа извлекаются из печи вместе с контейнером с теплоизолированными стенками, в котором они загружаются в инерционную печь. Стекло в контейнере охлаждается достаточно быстро, не превышая, однако, допустимой скорости охлаждения. Для более крупных заготовок этот прием не применяется: для них скорость охлаждения слишком велика и может вызвать их растрескивание.

Запас тепла, сохраняющийся в печи после выгрузки контейнера, обычно используется для первоначального нагрева новой партии стекла без включения тока. С этой целью заготовки малого и среднего размеров в другом контейнере загружаются в горячую печь.

34. Оптимальная форма и соотношение основных размеров печей тонкого отжига

Применяемые в оптической промышленности модели печей тонкого отжига всех типов и размеров имеют, как правило, цилиндрическую форму стакана. Эта форма является наиболее рациональной, так как при равномерном распределении нагревателей и толщины теплоизоляции, обеспечивает изотермичность внутренней поверхности стакана по окружности.

Отношение высоты стакана H к его диаметру D обычно близко к единице. Для печей средненерционного типа такое соотношение размеров наиболее рационально. При отношении $H/D \approx 1$ на единицу поверхности, рабочей

камеры приходится минимальное количество теплоизоляции, требуется минимальная затрата тепловой энергии для осуществления температурного режима и потеря тепла также наименьшая. Однако в отдельных моделях печей специального назначения целесообразнее применять стаканы с иным соотношением диаметра и высоты. Так, например, для отжига очень больших заготовок (дисков диаметром около 1 м и более с толщиной, равной примерно $1/7$ — $1/5$ диаметра, которые должны укладываться и отжигаться по одной штуке) — жаровое пространство печи должно соответствовать форме заготовки, т. е. иметь высоту меньше диаметра. Для печей инерционного типа лучше, чтобы H/D было больше единицы.

Среди существующих в оптической промышленности различных типов печей наименьшие имеют внутренние размеры стакана (диаметр и высоту) около 400 мм, а наибольшие — в три-четыре раза больше: диаметр около 1,5 м, высоту около 1,1 м.

Толщина стенки дна и крышки стакана в печах разных типов, размеров и различных моделей составляет 50—100 мм. При этом толщина стенки стакана диктуется тем, что большая масса металла создает большую объемную теплоемкость и выравнивает температуру вокруг рабочей камеры — переносит тепло от более нагретых участков стенки к менее нагретым, сглаживая местные перегревы от элементов нагревателя. Эту задачу выполняют также и укладочные приспособления. На долю последних в некоторых моделях печей падает даже большая часть всего переносимого тепла.

Толщина и материал теплоизоляции зависят от типа печи. В печах средненерционных и инерционных в качестве теплоизолирующего материала применяются кизельгур (диатомит), вермикулит, шлаковата или другой материал с низкой теплопроводностью. Толщина слоя теплоизоляции в зависимости от типа печи составляет от 150 до 350 и даже 400 мм. Чем больше толщина теплоизоляционного слоя и ниже его теплопроводность, тем больше его термическое сопротивление и меньше коэффициент теплопередачи.

Чем больше теплоемкость печи, создаваемая металлом, и чем больше термическое сопротивление теплоизоляционного слоя, тем больше инерционность печи. С увеличением инерционности печи становится ровнее ее

температурный ход — меньшими будут отклонения температуры от программной кривой, связанные с регулированием мощности электроэнергии в нагревателях.

Внешние габариты среднетемпературных печей варьируют в таких пределах: у малых — высота 700—800 мм, диаметр 650—700 мм; у больших — высота 1800 мм, диаметр (сторона) 2000—2100 мм.

Инерционные печи имеют высоту (с крышкой) до 2000 мм, диаметр — до 1600 мм.

35. Укладочные приспособления

Укладочные приспособления по форме и способу эксплуатации можно разделить на два типа: неразборные и разборные.

Укладочные приспособления неразборного типа представляют коробки цилиндрической формы (рис. 43, а) или в форме секторов (рис. 43, б).

Применяются также массивные круглые коробки (рис. 43, в) с секторообразными гнездами, в которые вставляются коробки из тонкого железа. У коробок из листового железа толщина стенок 2—3 мм. У массивных коробок толщина стенок и дна равны нескольким сантиметрам. Так, например, в коробках, изображенных на рис. 43, в, толщина стенок более 50 мм, а толщина дна 20 мм. Коробки с уложенным в них стеклом собираются в стопки вне печи. Для облегчения транспортировки к печи и от печи, а также загрузки и выгрузки ее, стопка массивных коробок собирается на специальном приспособлении — клетке, состоящей из стального поддона и трех укрепленных в нем также стальных стержней с кольцами на концах (рис. 44, а). Для загрузки, выгрузки и транспортировки тонкостенных секторных коробок применяются этажерки типа изображенной на рис. 44, б.

Разборное укладочное приспособление состоит из кольца и двух дисков; кольца и диски делаются из толстой

стали или из чугуна. Сталь для этой цели предпочтительнее, особенно, если поверхность ее защищена от коррозии. Толщина стенок колец зависит от их диаметра. Так, при диаметре в 300 мм толщина стенки составляет около 10 мм.

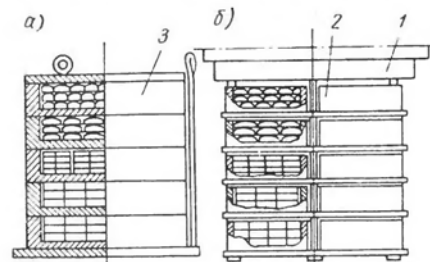


Рис. 44. Загрузочные приспособления:

1 — крышка печи; 2, 3 — коробки

Кольца, предназначенные для отжига крупнооблочных заготовок, при внутреннем диаметре около 1000 мм, имеют толщину 100 мм, а при диаметре около 1500 мм — толщину 150 мм. Таким образом, отношение толщины кольца к его внутреннему диаметру составляет около 0,1. Как уже отмечалось ранее, эти кольца совместно со стенкой стакана являются эффективным средством выравнивания температуры по поверхности заготовки.

Для того чтобы иметь возможность подбирать высоту кольца в соответствии с толщиной заготовки, оно набирается из отдельных колец меньшей высоты (100—125 мм) с хорошо проточенными торцовыми поверхностями (рис. 45).

Металлические диски имеют диаметр, соответствующий кольцу, с которым они комплектуются. От диаметра диска зависит его толщина. Относительная толщина металлических дисков, применяемых в практике отжига,

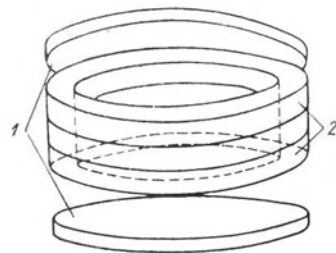


Рис. 45. Укладочные кольца 1 с дисками 2

довольно разнообразна. В лучшем случае эта толщина составляет 0,05—0,1 от диаметра, а в худшем — 0,025 и менее.

Для осуществления транспортировки тяжелых укладочных приспособлений от места сборки комплектов в печь и обратно и для облегчения сборки они снабжаются кольцами или другими средствами зацепления их подъемным устройством.

Отношение полезной высоты l укладочного приспособления (глубины коробки или сектора, высоты кольца) к его внутреннему диаметру D в существующих конструкциях находится в пределах от 0,1 до 0,4. Чем меньше это отношение, тем меньше перепад температуры по толщине заготовок или массы заготовок, уложенных в кольцо или коробку, следовательно, тем выше должно быть качество отжига, но в то же время тем меньше полезная емкость печи (больше относительная толщина металлических прослоек). Поэтому следовало бы снабжать печь отжига несколькими комплектами укладочных приспособлений с разным отношением высоты к диаметру.

Приспособления с малым отношением этих размеров могли бы служить для укладки заготовок с высокими требованиями по оптической однородности и двойному лучепреломлению, укладочные же приспособления с большим l_y/D_y применялись бы для отжига заготовок, для которых указанные требования невысоки.

Между укладочными приспособлениями и стенками печи всегда имеется небольшой зазор. Часто он бывает слишком мал. Размеры укладочных приспособлений должны быть рассчитаны так, чтобы между ними и внутренней поверхностью рабочей камеры вдоль боковой поверхности, дна и крышки оставался значительный воздушный промежуток. Этот промежуток необходим для того, чтобы не только теплопроводность металла, но и перекрестный теплообмен излучением между участками поверхности стенок печи и укладочных приспособлений (рис. 46, а) способствовал выравниванию температуры на поверхности стекла. Ширина промежутка должна быть порядка 30—50 мм. Легко подсчитать, что при высоте укладочного приспособления, например: кольца, $l_y = 100$ мм и расстояния между ним и стенкой $\sigma = 50$ мм 50% всего излучаемого боковой поверхностью кольца тепла попадает на противолежащий участок стенки печи,

а остальные 50% — на соседние участки; около 30 из этих 50% попадает на участки, противолежащие соседним кольцам (рис. 46, б). Если σ уменьшить в два раза (25 мм), то 70% тепла, излучаемого кольцом, будет участвовать в теплообмене с противолежащим участком и только 30% распространится на соседние (рис. 46, в). При дальнейшем уменьшении промежутка доля тепла, попадающего на соседние кольца, становится ничтожно малой. Такой же ничтожно малой становится роль теплоизлучения.

Для транспортировки укладочных приспособлений, загрузки и выгрузки их из печи применяется различное подъемно-транспортное оборудование: мостовые краны, кран-балки, тельферы и, наконец, просто тали. Выбор типа и марки подъемно-транспортного оборудования зависит от емкости печей и их конструкции, а также от размещения печей на участке отжига и от общей планировки этого участка.

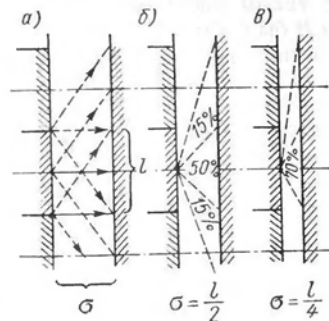


Рис. 46. Схема распределения лучистой теплоотдачи боковой стенки укладочного приспособления

36. Аппаратура для управления температурным режимом печи отжига и его регистрации

Выполнение заданного температурного режима отжига в печи производится с помощью программных регуляторов. Контроль исполняемого фактического температурного режима отжига производится с помощью регистрирующих (самопишущих) приборов. В настоящее время в качестве программных регуляторов и регистрирующих приборов применяются в основном электронные автоматические самопишущие потенциометры типов ЭПП и ЭПД.

В основе устройства этих приборов лежит компенсационный метод измерения электродвижущей силы термопары с помощью автоматической мостовой схемы. Принципиальная схема измерительного компенсационного моста показана на рис. 47. От источника тока E по ветвям

The diagram shows a Wheatstone bridge circuit. A DC voltage source E is connected to nodes C and D . The bridge arms contain resistors R_M , R_K , R_P , R_H , R , and R_D . Current I_1 flows through R_M and R_K . Current I_2 flows through R_H and R . The output signal is taken from node D and is labeled y and "Кусителю" (Amplifier). The current I is shown entering the bottom terminal.

Рис. 47. Схема автоматического компенсационного моста

было на СВ, и возникшее в мосте АУТВ₁ напряжение уравнивает электродвижущую силу термопары. Каждое из сопротивлений, образующих ветви мостовой схемы, имеет свое назначение. Сопротивление R_n компенсирует изменение электродвижущей силы термопары вследствие изменения температуры ее концов, подключенных к прибору, и делает показа-

пространства в пределах от 0 до $+60^\circ\text{C}$. Сопротивление R_k служит для подгонки начала шкалы при градуировке прибора, R_k — для установки рабочего тока, R_p — для регулирования тока, питающего схему в зависимости от изменения напряжения источника тока E ; и, наконец, сопротивление R_b является балластным, дополняющим сопротивление ветви CBD до требуемого значения.

Фактическая схема моста несколько сложнее (рис. 48). В нее вводятся дополнительные сопротивления $R_{нн}$, $R_{ш}$ и R_0 . Для периодической автоматической проверки напряжения, даваемого источником E , в схему введен нормальный элемент E_n и переключатель $Пк$, который периодически, через каждые 2,5 ч, на 8—10 сек включает в ветви моста нормальный элемент, если при этом напряжение между точками A и D не компенсирует напряжение нормального элемента, происходит автоматическое перемещение регулировочного реостата R_p .

При изменении температуры в печи в той ее точке, где находится спай термопары, в мосте нарушается баланс напряжений и в электронный усилитель поступает сигнал в виде постоянного тока. В усилителе этот ток с помощью специального вибрационного прерывателя преобразуется в переменный. Усилитель увеличивает мощность тока

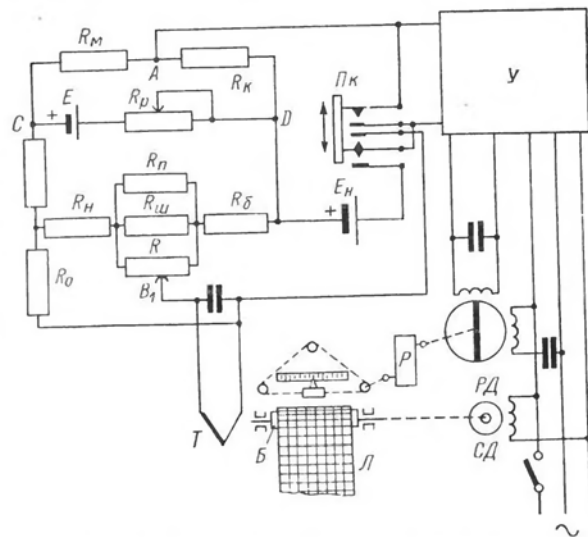


Рис. 48. Схема электрического потенциометра

настолько, что она становится достаточной для управления движением реверсивного двигателя РД, перемещающего через редуктор Р контактный ролик реохорда R, указатель шкалы и перо, вычерчивающее кривую.

В приборах типа ЭПД температурная кривая записывается на вращающейся дисковой бумаге с круговой сеткой. В отличие от этого запись в приборах типа ЭПП производится на непрерывно движущейся ленте (рис. 48). Равномерное вращение диска или барабана *Б* с лентой осуществляется с помощью синхронного двигателя *СД*.

Технические характеристики приборов обоих типов очень близки: 1) допустимая погрешность приборов не превышает $\pm 0,5\%$ от температурного интервала шкалы,

т. е. составляет около 5°C ; 2) вариации показаний также составляют не более 0,5%; 3) порог чувствительности и погрешности, являющихся следствием изменений температуры окружающего пространства и внешнего магнитного поля (если таковое существует), не превышает 0,1%.

Для контроля отжига удобнее пользоваться прибором типа ЭПП. Преимущество данного типа заключается прежде всего в том, что приборы этого типа выпускаются в многоточечных вариантах, т. е. они позволяют одновременно измерять температуру в нескольких точках. Так, например, ЭПП-09 М2 выпускается в исполнении на 3, 6 и 12 точек. Последнее обстоятельство дает возможность небольшим количеством приборов регистрировать температуру одновременно в нескольких печах и в нескольких точках каждой из них.

Другое преимущество приборов типа ЭПП заключается в большей наглядности и большем удобстве для анализа ленточной диаграммы по сравнению с дисковой, особенно, когда вопрос касается линейного отжига. На ленточной диаграмме можно сразу оценить степень прямолинейности хода температурной кривой, легко подсчитать в любом интервале температур скорость охлаждения печи и степень отклонений фактического хода температур от заданного. Запись на ленте дает непрерывную температурную кривую, даже если отжиг длится при минимальной скорости движения ленты 17—20 суток (длина ленты 25—30 м). Дисковые же диаграммы необходимо менять каждые сутки, а для анализа исполнительного режима нужно по показаниям прибора специально строить диаграмму в прямоугольных координатах.

Программное регулирование температуры печи производится с помощью прибора ЭПП-07 М2, который отличается от других моделей типа ЭПП тем, что в него вводится дисковая программа — заданная температурная кривая в полярных координатах, вырезанная из алюминиевого диска. По контуру кривой скользит кулачок, связанный с роликом реохора R . При вращении программной шайбы расстояние кулачка от ее центра меняется, заставляя ролик скользить по реохорду. Нарушающийся при этом баланс в мостовой схеме вызывает посылку сигнала в усилитель. Усиленный сигнал, в свою очередь, воздействует на исполнительный механизм — реле, включающее или выключающее электрический ток в печи в

зависимости от того, ниже или выше температура в печи относительно заданной по программе. Одновременно с программным регулированием температуры ЭПП-07 М2 производит также ее регистрацию в регулируемой точке.

В последнее время на заводах с успехом применяют программные регуляторы с ленточной программой, полученные путем переделки прибора ЭПП-09 с регистрацией одной точки.

37. Термопары и их размещение

В печах отжига обычно применяются термопары из материалов хромель—алюмель (градуировка прибора ХА). Температурный предел этих термопар $800\text{—}1000^{\circ}$. Для печей разных конструкций применяются термопары в различной armатуре с неподвижным штуцером и без штуцера. Иногда приходится устанавливать термопары в мягкой асбестовой изоляции. Однако во всех случаях учитывается обязательное требование: термопара должна быть возможно менее инерционной. Если нельзя применять ее с оголенным горячим спаем, то, во всяком случае, защитный колпачок должен быть возможно тоньше. Электроизоляционный защитный колпачок нужен, главным образом, для спая ведущей термопары, находящегося в непосредственной близости от нагревателя. Термопары же, помещаемые в рабочее пространство печи около стекла, могут иметь и оголенные спай, так как в печи отжига нет агрессивных газов, которые могли бы повлиять на электродный материал.

Размещение ведущих термопар зависит от конструкции печи. Если нагреватель печи имеет две или три независимо действующие секции и выполнение заданного режима в соответствующих участках печи осуществляется разными приборами, то к каждой из секций подводится отдельная ведущая термопара. В тех же случаях, когда программное регулирование температуры в печи выполняется лишь одним прибором, а межсекционное регулирование распределения электроэнергии производится вспомогательными средствами, например, с помощью реостатов, устанавливается только одна ведущая термопара.

Контрольные термопары должны устанавливаться с таким расчетом, чтобы они могли достаточно полно охарактеризовать распределение температуры в рабочем

пространстве, а, следовательно, и в массе загруженного в печь стекла. Поэтому спай термопар должны находиться в местах с наибольшим перепадом температуры. Последнее обстоятельство требует предварительного изучения печи. При размещении термопар должно учитываться качество самой печи, ее класс и качество отжигаемых заготовок, т. е. их категория по однородности, двойному лучепреломлению и класс однородности партии по показателю преломления.

Исходя из вышесказанного, в крупногабаритных печах отжига обычно размещается три—пять термопар. В среднегабаритных печах устанавливается две-три, и в малогабаритных — не более двух термопар. В печах линейного отжига спай термопар обычно помещают в середину поверхности верхнего слоя, в середину нижнего слоя и в центр (в печах большой емкости). В тех случаях, когда бывает необходимо знать перепад температуры по радиусу печи или ход температуры в краевой зоне стекла, помещают одну или две термопары в среднем, верхнем или нижнем слоях стекла на периферии.

В инерционных печах применяемых в настоящее время моделей конструктивно предусмотрена возможность введения только одной контрольной термопары, которая находится у боковой поверхности средней коробки или среднего слоя стекла. Однако этого, несомненно, недостаточно, поскольку такие печи не всегда свободны от перепада температуры, достигающего в иных случаях 10—20° С.

Заключение

В литературе по тонкому отжигу оптического стекла и в такой же степени в технологической документации почти не уделяется внимания экономике этого вопроса. Не составляет исключения в этом отношении и настоящая книга.

Тем не менее этот вопрос заслуживает специального изучения. Средний уровень затраты времени, труда и электроэнергии на тонкий отжиг одного килограмма оптического стекла определяется следующими условиями: 1) весьма большой и разнообразной номенклатурой заготовок оптического стекла по их маркам, размерам и техническим условиям; среди них имеется большое количество типов заготовок, выпускаемых небольшими партиями;

2) небольшим числом типов и размеров печей отжига; 3) стремлением к возможно более полному использованию полезной емкости печей; 4) стремлением ограничить разнообразие технологически необходимых режимов отжига небольшим числом стандартных или нормальных режимов.

Перечисленные условия приводят к тому, что цикл отжига для некоторых партий заготовок удлиняется по отношению к технологически необходимому в несколько раз. Это приводит к повышению их качества, однако, в некоторых случаях повышение качества не оправдывается назначением оптических деталей, которые изготавливаются из заготовок.

Большое и технологически совершенно нецелесообразное удлинение цикла отжига происходит, как правило, во всех типах печей, кроме разве только инерционных (и то лишь при правильном их использовании), на четвертом этапе отжига. На этом этапе охлаждение печи вследствие большой тепловой инерции идет значительно медленнее, чем может быть допущено по расчету.

Заготовки малого размера, выпускаемые большими сериями, к которым предъявляются относительно мягкие технические условия и расчетный цикл отжига которых достаточно короток, можно было бы отжигать в печах непрерывного действия соответствующей конструкции.

Увеличение производительности печей отжига и повышение их экономичности невозможно без разработки новых конструкций печей и совершенствования технологии процесса.

Дальнейшее развитие технологии и техники отжига должно идти, по мнению автора, в следующих направлениях.

1. Разработка оптимальной конструкции среднеинерционной печи, включая комплекс устройств для электропитания и регулирования температуры, обеспечивающей точное выполнение заданного режима.

2. Усовершенствование конструкций печей, позволяющее значительно ускорить охлаждение заготовок на четвертом этапе, приблизив его к расчетному. Этого можно достичь, меняя контейнеры по типу инерционных печей, или оснатив печи устройствами, ускоряющими их охлаждение. Такие печи будут более маневренными.

3. Увеличение разнообразия размеров печей, в частности, создание печей малой емкости, таких, чтобы даже

небольшие партии стекла можно было бы отжигать по режимам, соответствующим их размерам и техническим условиям.

4. Разработка печей непрерывного действия, отвечающих требованиям тонкого отжига.

5. Создание расчетной методики конструирования камерных печей тонкого отжига.

6. Применение технико-экономического анализа для расчета наиболее выгодных типов укладки заготовок, обеспечивающих получение наиболее высокого качества стекла при наименее длительном цикле отжига и наиболее высоком коэффициенте использования печей.

7. Применение электронно-вычислительной техники для комплектации партий, выбора размера печи, типа укладки и режима отжига, исходя из свойств стекла, технических условий и размеров заготовок. Это позволит отойти от стандартных режимов или значительно увеличить их число, что создаст значительную экономию электроэнергии и уменьшение затрат труда и времени на единицу продукции.

Необходимо совершенствовать конструкцию укладочных приспособлений, приравливая ее к размерам, форме и техническим условиям заготовок. При разработке новых конструкций важно также предусматривать механизацию операций укладки заготовок, загрузки в печь, выгрузки и транспортировки укладочных приспособлений.

Решение указанных задач поднимает технологию тонкого отжига заготовок оптического стекла на технический уровень, отвечающий задачам бурного развития отечественной промышленности.

Литература

1. Алексеенко М. П. Температурный ход вязкости некоторых стекол в интервале 10^8 — 10^{15} . — «Оптико-механическая промышленность», 1957, № 6, с. 64—66.

2. Вильнер Д. Е., Ильина О. В. Теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость стекол. Л.—М., Оборонгиз, 1939, с. 146—160 (Труды ЛенЗОС. Вып. 1).

3. Ванин В. И. Отжиг и закалка листового стекла. Изд. 2-е, переработ. и доп. М., Госстройиздат, 1965. 116 с.

4. Березина Е. Е. Оптический коэффициент напряжений стекол каталога оптического стекла. — «Оптико-механическая промышленность», 1967, № 8, с. 47—48.

5. Бокан П. Я. Изменение дисперсии оптического стекла в зависимости от его термической обработки. — «Оптико-механическая промышленность», 1937, № 12, с. 4—6.

6. Бужинский И. М., Кириллова И. И. Аномальные изменения дисперсии фтористо-титановых стекол. — «Оптико-механическая промышленность», 1962, № 9, с. 19—25.

7. Бужинский И. М., Кириллова И. И. Новый метод отжига оптического стекла, обеспечивающий высокую однородность независимо от скорости охлаждения. — «Оптико-механическая промышленность», 1962, № 3, с. 2—6.

8. Гребенщиков И. И., Филиппов Н. А., Чистова С. В. Измерение равновесных прямых оптических стекол. Л.—М., Оборонгиз, 1939, с. 140—145 (Труды ЛенЗОС. Вып. 1).

9. Баренбойм А. М., Галиева Т. М., Гинзбург Д. Б. и др. Тепловые расчеты печей и сушил силикатной промышленности. Под ред. Д. Б. Гинзбурга и В. Н. Зимина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Госстройиздат, 1964. 496 с.

10. Данюшевский Е. Э. Основы линейного отжига. М., Оборонгиз, 1959. 100 с.

11. Данюшевский Е. Э. Расчет эффекта края и волновой абберации, происходящей вследствие остаточных напряжений в дискотоможенном в безградиентной печи. — «Оптико-механическая промышленность», 1959, № 1, с. 51—56.

12. Исаева Л. В. Вязкость оптических стекол в интервале размягчения и отжига. — «Оптико-механическая промышленность», 1967, № 10, с. 43—46.
13. Казанцев Е. Л. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. М., изд-во «Металлургия», 1964. 451 с.
14. Кисин В. И. Упругие свойства стекла. — «Оптико-механическая промышленность», 1959, № 11, с. 36—37.
15. Китайгородский И. И., Качалов Н. Н., Варгин В. В. и др. Технология стекла. Учебник. М., Гостройиздат, 1961. 442 с.
16. Конюков В. П. Отжиг листового стекла. Известия Киевского политехнического института. Т. XXIX. Сборник трудов химико-технологического факультета. Ч. 2, 1960, с. 69—80.
17. Лебедев А. А. Об отжиге оптического стекла. Л., 1924, с. 1—32 (Труды ГОИ. Т. III. Вып. 24).
18. Применко В. И. Влияние свойств оптических стекол на процесс охлаждения. ДАН УССР. Т. 10, 1966, с. 1322—1324.
19. Родникова В. В. и Сахно В. Н. Исследование зависимости теплоемкости баритовых стекол от их химического состава и температуры. — «Оптико-механическая промышленность», 1967, № 4, с. 32—34.
20. Стожаров А. И. Изменение показателя преломления стекла при высоких температурах в связи с вопросом об обжиге оптического стекла. Л., 1928, с. 1—35 (Труды ГОИ. Т. IV. Вып. 39).
21. Стожаров А. И. Измерение расширения стекла как метод исследования его строения. — Строение стекла. М.—Л., АН СССР, 1955, с. 120—125 (Труды совещания по строению стекла).
22. Тудоровская Н. А. Структурные изменения показателя преломления стекол при температурах ниже 300° С. — Строение стекла. М.—Л., АН СССР, 1955, с. 190—197 (Труды совещания по строению стекла).
23. Флоринская В. А. Изменение напряжений в оптическом стекле при длительном отжиге. ДАН СССР, LXI, 1948, № 6, с. 1039—1042.
24. Флоринская В. А. Изменение показателя преломления и дисперсии оптического стекла при тепловой обработке. Л., 1950, с. 1—109 (Труды ГОИ. Т. XIX. Вып. 131).
25. Чиркин В. С. Теплофизические свойства некоторых металлов. М., Физматгиз, 1959. 356 с.
26. Adams L. H. a. Williamson E. D. The annealing of glasses. — «J. Franklin Inst», 1920, nov.—dec., p. 597.
27. Deeg E. W. Quelques propriétés du verres trempé. — «Verres et refr.», V. 20, 1966. N 5, p. 325—327.
28. Klemm A. u. Berger E. Untersuchungen über den Ausdehnungsverlauf beim Uebergang von Spröden in Zähflüssiges Glass. — «Glasstechn. Ber». B. 9, 1927—28, S. 405—417.
29. Prod'homme L. Certains aspects de l'évolution thermique et de la stabilisation de propriétés du verre. — «Revue d'optique». V. 36, 1957, N 7, p. 309—342, N 8, p. 391—422.
30. Prod'homme M. Contribution a l'étude de la viscosité de verres. — «Revue d'optique». V. 39, 1960, N 3, p. 95.
31. Peters C. G. a. Cragoe C. H. Mesurment of the thermal dilatation of glasses at high temperatures. — «J. Opt. Soc. Amer.», V. IV, 1920, p. 105.
32. Rötger H. u. Besen H. Ein rationelles Kühlverfahren zur Toleranzeinengung der Brechungsverhältnisses Optisches Gläser. — «Feingeratetechnik». B. 10, 1961, N 12, S. 547—558.
33. Rötger H. u. Besen H. Brechzahlbeeinflussung durch Feinkühlung bei Jeneer Optischen Gläsern. — «Silikattechnik». B. 13, 1962, N 12, S. 424—427.
34. Williamson E. D. a. Adams L. H. Temperature distribution in solid during heating and cooling. — «Phys. Rev». V. 14, 1919, ser. II, p. 99—115.
35. Winter A. La solidification vitreuse. — «Verres et réfr». V. 17, 1963, N 2, p. 88—94.
36. Winter — Kein A. Evolution de la viscosité du verre en fonction de la temperature. — «Verres et réfr.». V. 7, 1953, N 4, p. 217—227.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Предисловие | 3 |
| Глава I. Теоретические основы отжига | 5 |
| 1. Представление о строении стекла | — |
| 2. Разность температур в стекле при его нагревании или охлаждении | 8 |
| 3. Напряжения в стекле временные и остаточные | 11 |
| 4. Краевые напряжения | 20 |
| 5. Двойное лучепреломление | 22 |
| 6. Релаксация напряжений | 24 |
| 7. Структурные изменения показателя преломления стекла в критической области | 26 |
| 8. Изменение дисперсии в критической области | 34 |
| 9. Неоднородность стекла и ее происхождение. Физическая неоднородность 1 и 2-го рода | 35 |
| 10. Температура отжига | 37 |
| 11. Область отжига и ее границы | 38 |
| Глава II. Требования к качеству отожженных заготовок оптического стекла | 42 |
| 12. Типы и размеры заготовок оптического стекла | — |
| 13. Оптические постоянные | 43 |
| 14. Нормирование оптической однородности | 44 |
| 15. Нормирование двойного лучепреломления | 48 |
| Глава III. Укладка заготовок и ее влияние на качество отжига | 49 |
| 16. Реальные условия отжига заготовок | — |
| 17. Влияние способа укладки заготовок на перепад температуры в них, напряжения и оптическую однородность | 50 |
| 18. Толстые металлические прокладки | 60 |
| 19. Воздушные промежутки | 67 |
| 20. Защитное кольцо | 71 |
| 21. Примеры укладки круглых заготовок разных размеров | 77 |
| 22. Примеры укладки заготовок сложной формы | 79 |
| Глава IV. Процесс тонкого отжига заготовок оптического стекла. Типы отжига | 83 |
| 23. Этапы процесса отжига | — |
| 24. Нагревание заготовок | 84 |
| 25. Выдерживание стекла при температуре отжига | 86 |
| 26. Ответственное охлаждение стекла в линейном отжиге. Переходный период | 96 |
| 27. Скорость ответственного охлаждения | 100 |

| | |
|---|-----|
| 28. Температурная граница между ответственным и неот- | 113 |
| ветственным охлаждением | 114 |
| 29. Неответственное охлаждение | 117 |
| 30. Инерционный отжиг | 122 |
| 31. Ускоренный отжиг | 126 |
| Глава V. Печи тонкого отжига | — |
| 32. Основные требования к печам тонкого отжига и принципы их устройства | 127 |
| 33. Классификация печей тонкого отжига | 130 |
| 34. Оптимальная форма и соотношение основных размеров печей тонкого отжига | 134 |
| 35. Укладочные приспособления | 136 |
| 36. Аппаратура для управления температурным режимом печи отжига и его регистрации | 139 |
| 37. Термодары и их размещение | 143 |
| Заключение | 144 |
| Литература | 147 |

Моисей Саулович ГОМЕЛЬСКИЙ
**ТОНКИЙ
 ОТЖИГ
 ОПТИЧЕСКОГО
 СТЕКЛА**

Редактор издательства И. А. Денина
 Обложка художника Н. И. Васильева
 Технический редактор Т. П. Малашук
 Корректор З. С. Николаева

Сдано в производство 21/IV 1969 г. Подписано к печати 31/X 1969 г.
 М-50905 Формат бумаги 84×108^{1/32} Печ. л. 7,98 Уч.-изд. л. 7,9
 Тираж 2000 экз. Заказ 173 Цена 42 коп.

Ленинградское отделение издательства «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
 Ленинград, Д-65, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома Комитета по печати
 при Совете Министров СССР Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10